

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vedran Požgaj

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Vedran Požgaj

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću na pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se i višoj asistentici dr. sc. Tanji Tomić kao i laborantima katedre za zavarene konstrukcije za pomoć i realizaciju eksperimentalnog dijela rada.

Hvala laborantima laboratorija za materijalografiju i laboratorija za zaštitu materijala na pomoći oko pripreme ispitnih uzoraka.

Također se zahvaljujem tvrtci Messer Croatia plin d.o.o. na ustupljenim zaštitnim plinovima potrebnim za realizaciju eksperimentalnog dijela diplomskog rada.

Vedran Požgaj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **VEDRAN POŽGAJ** Mat. br.: **0035174530**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ ZAŠTITNOG PLINA NA MAG ZAVARIVANJE AUSTENITNIH ČELIKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF THE SHIELDING GAS ON MAG WELDING OF AUSTENITIC STEEL**

Opis zadatka:

Dati pregled i analizirati zavarljivost visokolegiranih nehrđajućih čelika sa posebnim naglaskom na austenitne čelike. Opisati MAG postupak zavarivanja i definirati sve načine prijenosa metala u električnom luku, parametre zavarivanja, dodatne materijale i zaštitne plinove. Specificirati sve inačice mješavina zaštitnih plinova koje se primjenjuju za zavarivanje visokolegiranih austenitnih čelika i odrediti funkcije pojedinih konstituenata. Dati neke primjere primjene austenitnih čelika u industrijskoj proizvodnji.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je za osnovni materijal iz skupine visokolegiranih austenitnih čelika razraditi plan eksperimenta te definirati tehnologiju zavarivanja za MAG zavarivanje pri čemu je potrebno koristiti više vrsta plinskih mješavina. Tijekom zavarivanja potrebno je analizirati operativne značajke stabilnosti procesa a na zavarenim uzorcima ocijeniti izgled i kvalitetu zavareske te odrediti penetraciju i geometriju spoja. U konačnici, donijeti zaključke o optimalnoj plinskoj mješavini za MAG zavarivanje austenitnih čelika.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Ivica Garašić


Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	VIII
POPIS KRATICA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD	1
2. VISOKOLEGIRANI ČELICI	2
2.1. Feritni čelici.....	3
2.2. Austenitni čelici.....	4
2.3. Martenzitni čelici.....	6
2.4. Feritno – austenitni (dupleks) čelici	8
3. UTJECAJ LEGIRNIH ELEMENATA NA SVOJSTVA ČELIKA.....	10
4. ZAVARLJIVOST	13
5. POSTUPCI ZAVARIVANJA.....	15
5.1. TIG postupak.....	15
5.2. MIG/MAG postupak	17
5.2.1. Prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanja.....	18
5.2.2. Pištolj za MIG/MAG zavarivanje	20
5.2.3. Dodavač žice	21
5.3. REL postupak	22

5.4. Plazma postupak.....	24
5.5. EPP postupak.....	25
5.6. Zavarivanje laserom	27
6. PRIPREMA SPOJEVA.....	28
7. ZAŠTITNI PLINOVI.....	30
7.1. Argon.....	31
7.2. Helij.....	32
7.3. Ugljični dioksid	32
7.4. Plinske mješavine	32
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	34
8.1. Uvod.....	34
8.2. Zavarivanje uzoraka	35
8.2.1. Osnovni materijal	35
8.2.2. Dodatni materijal.....	35
8.2.3. Zaštitni plin	36
8.2.4. Uređaj za zavarivanje i parametri.....	37
8.2.5. Priprema uzoraka.....	40
8.2.6. Navarivanje	41
8.2.7. Kutni spoj.....	46
8.3. Izrada uzoraka	52
8.3.1. Izrezivanje uzoraka.....	52

8.3.2. Brušenje uzoraka	53
8.3.3. Nagrizanje uzoraka.....	55
8.4. Geometrija zavora	56
8.5. Mjerenje feritnog broja.....	61
8.6. Analiza rezultata.....	63
8.7. Osvrt na trošak plina	64
9. ZAKLJUČAK	65
10. POPIS LITERATURE	66

POPIS SLIKA

Slika 1. Mikrostruktura feritnog čelika [7].....	3
Slika 2. Mikrostruktura austenitnog čelika [7].....	4
Slika 3. Mikrostruktura martenzitnog čelika [7]	7
Slika 4. Mikrostruktura dupleks čelika [7].....	8
Slika 5. Zavarljivost materijala [9].....	13
Slika 6. TIG postupak zavarivanja [11]	15
Slika 7. Dijelovi TIG pištolja [12]	16
Slika 8. MIG/MAG postupak zavarivanja [11]	17
Slika 9. Impulsna struja [13]	20
Slika 10. Pištolj za MIG zavarivanje [14]	20
Slika 11. Dijelovi pištolja [15]	21
Slika 12. Sustav za dobavu žice [16].....	22
Slika 13. REL postupak zavarivanja [8].....	22
Slika 14. Plazma zavarivanje [18].....	24
Slika 15. EPP postupak zavarivanja [8]	25
Slika 16. Lasersko zavarivanje [8]	27
Slika 17. "V" spoj za lim i ploču [21]	28
Slika 18. "I" spoj za lim [21].....	28
Slika 19. Obostrani "V" spoj za ploču [21]	28
Slika 20. Jednostrani "U" spoj za ploču [21].....	29

Slika 21. Obostrani "U" spoj za ploču [21]	29
Slika 22. Zaštitni plinovi za zavarivanje i rezanje [24]	30
Slika 23. Uređaj za zavarivanje Varstroj WB-P400 (w)	37
Slika 24. Radno mjesto.....	39
Slika 25. Čišćenje i odmašćivanje uzoraka	40
Slika 26. Navarivanje uzorka 1.1	41
Slika 27. Navarivanje 130 A	42
Slika 28. Navarivanje 170 A	43
Slika 29. Navarivanje 210 A	44
Slika 30. Mjerenje međuprolazne temperature	45
Slika 31. Prikaz postava eksperimentalnog rada za zavarivanje	46
Slika 32. Uzorak 1.1	47
Slika 33. Uzorak 1.2	47
Slika 34. Uzorak 1.3	48
Slika 35. Uzorak 2.1	48
Slika 36. Uzorak 2.2	49
Slika 37. Uzorak 2.3	49
Slika 38. Uzorak 3.1	50
Slika 39. Uzorak 3.2	50
Slika 40. Uzorak 3.3	51
Slika 41. Izrezivanje uzoraka	52

Slika 42. Izgled izrezanog uzorka	52
Slika 43. Grubo brušenje uzoraka	53
Slika 44. Brusni papir za ručno brušenje.....	53
Slika 45. Brušenje kutnih uzoraka.....	54
Slika 46. Elektrokemijski postupak nagrivanja uzoraka	55
Slika 47. Mjere na navarenom uzorku	56
Slika 48. Mjere na kutnom uzorku	57
Slika 49. Mjerenje feritnog broja	61
Slika 50. Mjesta mjerenja feritnog broja	62
Slika 51. Cijene plinova	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna svojstva visokolegiranih čelika [5].....	2
Tablica 2. Mehanička svojstva austenitnih čelika [6]	5
Tablica 3. Svojstva zaštitnih plinova [23]	31
Tablica 4. Plan pokusa	34
Tablica 5. Kemijski sastav čelika 1.4301	35
Tablica 6. Mehanička svojstva čelika 1.4301	35
Tablica 7. Kemijski sastav žice MIG-309LSi	35
Tablica 8. Mehanička svojstva žice MIG-309LSi.....	36
Tablica 9. Parametri zavarivanja	38
Tablica 10. Oznake uzoraka	39
Tablica 11. Geometrija navarenih uzoraka	58
Tablica 12. Geometrija kutnih uzoraka	59
Tablica 13. Rezultati mjerenja feritnog broja.....	62

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
λ	W/(mK)	Koeficijent toplinske vodljivosti
Ω	Ω	Električni otpor
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Granica razvlačenja
A_5	%	Istezanje
KV	J	Udarni rad loma
C_{ekv}	%	Ekvivalentni sadržaj ugljika
I	A	Jakost struje
U	V	Napon
b	mm	Širina zavara
h	mm	Nadvišenje zavara
p	mm	Penetracija zavara
A	mm ²	Površina metala zavara
Q	kJ/mm	Unos topline
FN	%	Ferritic Number

POPIS KRATICA

MAG	Metal Active Gas
AISI	American Iron and Steel Institute
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
EWE	European Welding Engineer
TIG	Tungsten Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
EPP	Zavarivanje pod zaštitom pijeska
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U ovom radu je ispitan utjecaj zaštitnog plina na zavarivanje austenitnih čelika. U teorijskom dijelu su dani osnovni podaci o nehrđajućim čelicima te o postupcima zavarivanja s naglaskom na MAG (Metal Active Gas) postupak zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu provodi se zavarivanje uzoraka MAG postupkom s tri različita zaštitna plina i tri različita unosa topline. Osnovni materijal je austenitni nehrđajući čelik oznake 1.4301 (AISI 304), a dodatni materijal je žica oznake MIG 309-LSi promjera 1,2 mm. Nakon zavarivanja pripremljeni su makroizbrusci na kojima je provedeno ispitivanje na temelju kojeg su doneseni zaključci o utjecaju zaštitnog plina.

Ključne riječi: austenitni čelik, zaštitni plin, MIG/MAG zavarivanje

SUMMARY

This thesis describes the influence of shielding gases on geometry and appearance of austenitic stainless steel. The theoretical part gives some basic information about stainless steels and about welding processes with special emphasis on MAG welding process.

The experimental part is carried out with MAG welding process with three different shielding gases (M12, M13, R1) and three different heat input levels. Base material is austenitic stainless steel grade 1.4301 (AISI 304), and filler material is a wire MIG 309-LSi with 1,2 mm diameter. After welding, macro specimens were investigated in order to determine influence of the shielding gases.

Key words: austenitic steel, shielding gas, MIG/MAG welding

1. UVOD

Da bi neki čelik bio primjenjiv u nekim uvjetima eksploatacije, mora zadovoljiti osnovne uvjete koji su usko vezani uz svojstva materijala, npr. mehanička svojstva i korozijska postojanost. U vidu treba imati da će se taj materijal prije ili nakon montaže tehnološki obrađivati. Materijal treba i nakon tehnološke obrade zadržati približno ista svojstva koja je imao prije obrade.

Jedna od neizostavnih tehnoloških operacija u većini procesa je zavarivanje. Zavarivanje predstavlja veliki izazov zadržavanja dovoljno dobrih svojstava čelika budući da tijekom i nakon zavarivanja određeni parametri mogu bitno narušiti svojstva osnovnog materijala koji se zavaruje. Prolaskom vremena, došlo je do razvoja, kako osnovnih tako i dodatnih materijala za zavarivanje te su time poboljšana svojstva samih zavarenih spojeva. Naravno, bitan utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja imaju i sami uređaji za zavarivanje koji su također napredovali kroz povijest. Kod MAG postupka zavarivanja potreban je uz osnovnu opremu i zaštitni plin koji štiti zavareni spoj od utjecaja atmosfere ali je i važan čimbenik za kvalitetu i izgled samog zavarenog spoja. Primjena različitih mješavina zaštitnog plina omogućuje veliko poboljšanje zavarivanja. Zaštitni plinovi mogu omogućiti veću produktivnost i osigurati bolju kvalitetu zavora.

U eksperimentalnom dijelu rada promatrao se utjecaj tri različite mješavine zaštitnog plina s obzirom na tri različita unosa topline. Utjecaj se promatrao kod navarivanja te kod kutnog spoja limova debljine 10 mm. Analizom rezultata doneseni su zaključci o izgledu zavarenog spoja te o samoj geometriji zavora.

Budući se danas puno koriste proizvodi od austenitnih čelika, na njima je i provedeno ispitivanje. Austenitne čelike karakterizira niska čvrstoća i visoka duktilnost te visoka otpornost na rupičastu, napetosnu i interkristalnu koroziju.

2. VISOKOLEGIRANI ČELICI

Razvoj i primjena visokolegiranih čelika započinje početkom 20. stoljeća. Patentirao ih je 1912. godine poznati proizvođač čelika Krupp. Od tog razdoblja pa sve do danas, ti se materijali konstantno razvijaju, ovisno o potrebama primjene. U početku im je najčešća primjena bila u priboru za jelo, a zatim u petrokemijskoj industriji [1,2].

Postoji nekoliko podjela nehrđajućih čelika od kojih je najbitnija podjela prema strukturi.

Visokolegirani čelici prema strukturi materijala:

- feritni čelici,
- austenitni čelici,
- martenzitni čelici,
- feritno – austenitni (Dupleks) čelici.

Danas postoje novije skupine ovih čelika kao što su super i meko martenzitni čelici kojima su legiranjem poboljšana svojstva. Prema primjeni visokolegirani čelici se dijele na korozijski postoje, vatrootporne, alatne i dr. [3,4].

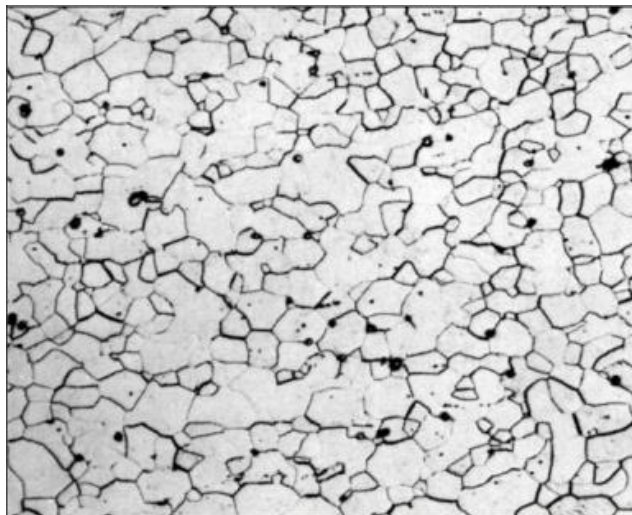
Neka fizikalna svojstva viskoloegiranih čelika prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Fizikalna svojstva visokolegiranih čelika [5]

VRSTA ČELIKA		Fizikalna svojstva				
		α $10^{-6} \times K^{-1}$ (100 °C - 500 °C)	λ W/(m x K) (20 °C)	Ω $\Omega \times mm^2/m$ (20 °C)	E kN/mm ² (20 °C)	Magnetičnost
VISOKOLEGIRANI ČEL	Feritni	10,5 - 12,0	29	0,60	210	+
	Martenzitni	10,5 - 12,0	30	0,60	210	+
	Austenitni	16 - 18	15	0,73	200	-
	Austenitno-feritni (duplex)	12,5 - 13 (300 °C)	14	0,79	206	+
Nelegirani čelici		13	47	0,15	205	+

2.1. Feritni čelici

Feritni čelici sadrže 13 % – 17 % Cr i $< 0,1$ % C te imaju feritnu mikrostrukturu bez sposobnosti fazne transformacije i usitnjenja zrna (Slika 1) [6].



Slika 1. Mikrostruktura feritnog čelika [7]

Usitnjenje zrna moglo bi se postići u nekim slučajevima pomoću hladne deformacije te rekristalizacijskim žarenjem.

Feritni čelici su visoko korozijski otporni na djelovanje dušične kiseline i njenih vodenih otopina, amonijevoj salitri te smjesi dušične, fosforne i solne kiseline. Nisu otporni na djelovanje rastaljenih metala (Al, Sb, Pb), amonijevog bifluorida, barijevog klorida, broma, octene kiseline i sl.

Bitna svojstva feritnih čelika su:

- relativno su mekani,
- magnetični,
- slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna (> 900 °C),
- slaba deformabilnost,
- dobra obradivost odvajanjem čestica,
- loša postojanost u kloridnim otopinama,
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije,
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika,
- skloni lomu pri niskim temperaturama.

Uklanjanje ili smanjenje navedenih nedostataka može se postići povišenjem udjela kroma, sniženjem udjela ugljika te legiranjem s molibdenom i niklom. Znatna poboljšanja svojstava postižu se porastom čistoće feritnih čelika, tj. dobivanjem vrlo niskih udjela nečistoća i primjesa pomoću suvremenih metoda rafinacije.

2.2. Austenitni čelici

Austenitni čelici se danas najviše primjenjuju, karakterizira ih niska čvrstoća i visoka duktilnost te visoka otpornost na rupičastu, napetosnu i interkristalnu koroziju (osim u zoni utjecaja topline). Austenitni čelici najčešće sadrže 0,02 % – 0,15 % C, 15 % – 20 % Cr, 7 %– 20 % Ni uz moguće dodavanje molibdena, titana, niobija, tantala, dušika. Svi dodaci, osim dušika, dovode do pojave ferita u mikrostrukturi. Dodatkom nikla i dušika djeluje se na proširenje područja austenita te na snižavanje temperature početka stvaranja martenzita. Austenitni čelici mogu prijeći u martenzitno stanje „dubokim“ hlađenjem ili hladnom deformacijom. Mikrostruktura austenitnih čelika može biti monofazno austenitna ili austenitno – feritna (s 5 % – 10 % delta ferita). Delta ferit negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj preradi (valjanje, kovanje), ali je ipak nužan radi otežavanja toplih pukotina [6]. Mikrostruktura austenitnog čelika prikazana je na slici 2.



Slika 2. Mikrostruktura austenitnog čelika [7]

Osnovni zahtjevi prema kemijskom sastavu da se postigne austenitna mikrostruktura su:

- maseni udio ugljika treba biti što niži ($< 0,15\%$) jer je tada manja opasnost nastanka karbida Cr_{23}C_6 koji je uzrok interkristalne korozije,
- maseni udio kroma što viši ($> 18\%$) radi povećanja antikorozivnosti,
- maseni udio nikla što viši ($> 8\%$) kako bi nikal kao gamageni element, prevladao alfabeno djelovanje kroma i doveo do nastanka austenitne mikrostrukture,
- dodatno legiranje s molibdenom, titanom, niobijem i/ili tantalom koji pospješuju nastanak $5\% - 10\%$ delta ferita te djeluju stabilizirajuće na otpornost prema interkristalnoj koroziji,
- povišeni udjel dušika ($0,2\% - 0,4\%$) radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetosnu i jamičastu koroziju.

Poznato je da toplinska obradba utječe na svojstva upotrebe i prerade, a time i na mogućnost primjene čelika. Austenitni čelici nisu sposobni da se zakale ili poboljšaju transformacijom jer nema faznih transformacija.

Glavni problem u pogledu korozijske otpornosti predstavlja karbid Cr_{23}C_6 čiji se nastanak može izbjeći jakim karbidotvorcima koji stvaranjem karbida onemogućavaju spajanje ugljika s kromom te na taj način sprječavaju osiromašenje perifernih zona austenitnih zrna.

Najčešće primjenjivani čelici s niskim sadržajem ugljika su AISI 304L, AISI 316L, AISI 316LC. Svojstva tih čelika prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Mehanička svojstva austenitnih čelika [6]

OZNAKA ČELIKA			SASTAV OSTALO %	MEHANIČKA SVOJSTVA				
VDEh	HRN	AISI		R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A_5 , %	Z , %	KV , J
X2CrNi 18 9	Č45701	304L	-	450-700	175	50	60	85
X2CrNiMo 18 10	Č45703	316L	2,2 Mo	450-700	195	45	60	85
X2CrNiMo 18 12	-	316LC	2,8 Mo	450-700	195	45	60	85
X2NiCr 18 16	-		-	440-690	175	50	60	85
X2CrNiMo 18 16	-		3,5 Mo	500-700	195	45	-	85

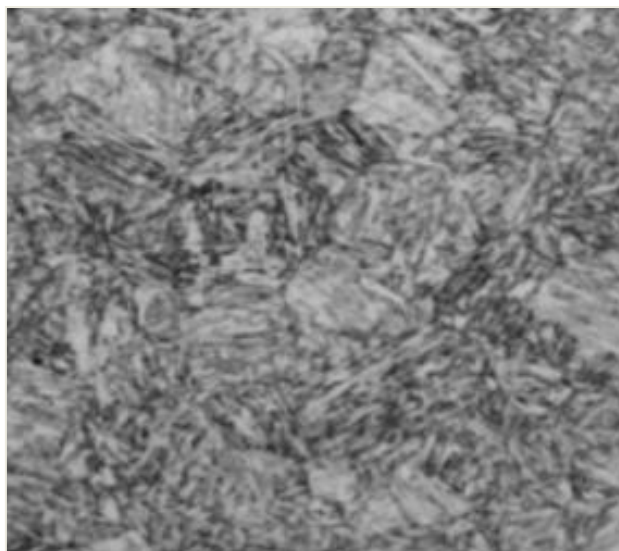
Karakteristična područja primjena austenitnih čelika su kod uređaja u mljekarama i pivovarama, uređaji u industriji celuloze, boja, tlačne posude povišene postojanosti na koroziju i slično [6].

Neka od bitnijih svojstava austenitnih čelika su:

- nema mogućnosti usitnjavanja zrna,
- nemagnetični su,
- veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika,
- odlična plastičnost,
- visoka žilavost, oksidacijska i korozijska postojanost,
- visok odnos čvrstoća/masa,
- dobra svojstva pri niskim temperaturama,
- nisu skloni povećanju zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja [6].

2.3. Martenzitni čelici

Martenzitni čelici imaju povišen udio ugljika (0,2 % – 1,0 %), iznad 13 % kroma te mogu sadržavati do 1,3 % molibdena i 2,5 % nikla. Optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost ovih čelika postiže se kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Mogu se podijeliti u dvije podskupine: konstrukcijski (sadrže do 0,25 % C, poboljšavaju se) i alatni (> 0,3 % C, nakon kaljenja se nisko popuštaju). Kod konstrukcijskih čelika posebna pažnja se usmjerava prema korozijskoj postojanosti, a kod alatnih postoji dodatni zahtjev prema otpornosti na abrazijsko trošenje. Upravo zbog toga alatni čelici imaju dvofaznu mikrostrukturu (martenzit i karbid) čija je korozijska postojanost niža od jednofazne martenzitne mikrostrukture koja je prikazana na slici 3.



Slika 3. Mikrostruktura martenzitnog čelika [7]

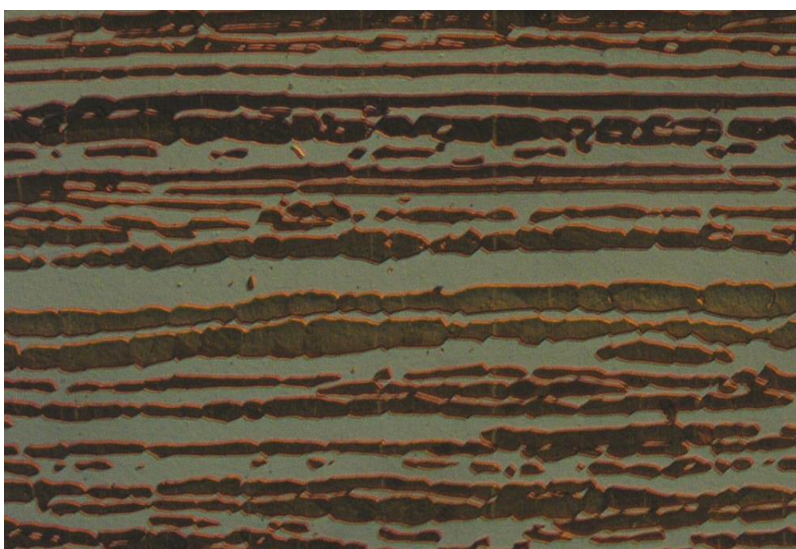
U odnosu na feritne i austenitne čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje.

Čelici s 13 % Cr i iznad 0,3 % C, pri temperaturi 1000 °C u austenitu imaju otopljeno oko 12,5 % kroma i 0,3 % ugljika što je dovoljno za korzijsku postojanost budućeg martenzita, ali nedovoljno za maksimalnu zakaljenost čelika. Stoga je austenitizaciju potrebno provesti na višim temperaturama. Konstrukcijski martenzitni čelici sadrže manje ugljika od alatnih pa se popuštaju pri višim temperaturama. Gašenjem se postiže monofazna martenzitna ili martenzitno – karbidna struktura.

Ukoliko se sadržaj ugljika smanji ($<0,10\%$) tada nastaju tzv. mekomartenzitni čelici koji spadaju u visokočvrste čelike (granica razvlačenja do 1000 N/mm^2). Sniženje mehaničkih svojstava (čvrstoća, granica razvlačenja) u tom slučaju nadomješta se legiranjem s kromom, niklom i molibdenom. Ova vrsta čelika uglavnom se primjenjuje za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka, izradu lopatica Peltonovih i Kaplanovih turbina, za valjke u proizvodnji papira izradu dijelova pumpi i sl.

2.4. Feritno – austenitni (dupleks) čelici

Dupleks čelici posjeduju dvofaznu austenitno – feritnu mikrostrukturu s 40 % – 60 % ferita. Čelik s 22 % – 24 % kroma i 6 % – 8 % nikla pri temperaturi 20 °C, tj. zagrijan do približno 1000 °C sastojati će se od ferita i austenita. Ukoliko su prisutni ostali legirajući elementi tada vrijedi da ostatak molibdena, silicija, titana i niobija djeluje slično kao porast sadržaj kroma, a mangana, bakra, dušika i ugljika kao povišenje sadržaja nikla. Povišenjem temperature iznad 1000 °C poraste udio ferita a smanjuje se udio austenita tako da čelik s 22 % kroma i 8 % nikla pri 1350 °C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostrukturu. Mikrostruktura dupleks čelika prikazana je na slici 4.



Slika 4. Mikrostruktura dupleks čelika [7]

Zbog dvofazne austenitno – feritne mikrostrukture dupleks čelici pokazuju manju otpornost prema općoj koroziji ali imaju povišenu postojanost prema napetosnoj i jamičastoj koroziji. Jedan od glavnih ciljeva legiranja dupleks čelika je održavanje dovoljno visokog udjela austenita što je posebice važno tijekom zavarivanja. Previsoki sadržaj ferita može uzrokovati sniženje korozijske postojanosti te pojavu krhkosti. Sniženi udio nikla u dupleks čelicima potrebno je kompenzirati dodatkom dušika ili mangana.

Primjena dupleks čelika pri povišenim temperaturama je moguća, ali zbog ograničenja primjene na maksimalno 250 °C - 350 °C primjena je znatno sužena. Razlog tog ograničenja primjene je pojava „krhkosti 475“ koja se javlja u dupleks čelicima u feritnoj fazi po istom principu kao i kod feritnih čelika.

Postojanost dupleks čelika prema interkristalnoj koroziji je viša što je viši sadržaj ferita. Budući se krom otapa u feritu, a ugljik u austenitu, teže se stvaraju karbidi Cr_{23}C_6 nego kod austenitnih čelika. Karbid Cr_{23}C_6 nastati će na granicama ferit/austenit pa je mreža karbida isprekidana, a napredovanje korozije sporije nego kod austenitnih čelika[6].

Dupleks čelici se najčešće primjenjuju u industriji nafte i plina, petrokemijskoj industriji, kemijsko – procesnoj industriji, brodogradnji.

3. UTJECAJ LEGIRNIH ELEMENATA NA SVOJSTVA ČELIKA

Glavni legirni elementi u visokolegiranim čelicima su krom, nikal, molibden, mangan, silicij, a u posebnim slučajevima koriste se titan, tantal, niobij i drugi. Ugljik je sastavni dio čelika i ne smatra se legirnim elementom. Visina njegova udjela povećava čvrstoću i granicu razvlačenja, a snižava duktilnost. Izbjegava se povećanje udjela ugljika, jer se dio kroma spaja u karbide tako da preostali krom postaje beskoristan za pasivaciju. Legirajući elementi se dijele na one koji proširuju područje austenita pa se nazivaju gamageni elementi i one koji proširuju područje ferita pa se nazivaju alfageni elementi.

Legirajući elementi se u čeliku pojavljuju:

- otopljeni u α – željezu ili γ – željzu,
- kao spojevi (karbidi, intermetalni spojevi),
- kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, sulfidi, fosfidi) [6].

Krom (Cr)

Krom je jak karbidotvorac i proširuje područje ferita jer je alfageni element. Omogućuje kaljenje čelika u ulju budući da povišuje prokaljivost čelika i snižava temperaturu početka stvaranja martenzita. Zbog afiniteta prema ugljiku krom stvara karbide pa se često dodaje čelicima za izradu reznih alata. Karbidi kroma povećavaju otpornost na trošenje čime se povećava izdržljivost i trajnost oštrice proizvedenog alata. Dodatkom kroma kao legirajućeg elementa povišuje se toplinska čvrstoća, vatrootpornost i otpornost na djelovanje komprimiranog vodika. Ukoliko se uz krom ne dodaju elementi koji proširuju područje austenita (Ni, Mn) niskougljični čelik s $< 0,1 \% C$ i $> 15\% Cr$ posjedovati će postojanu feritnu mikrostrukturu od sobne temperature do temperature solidusa. Legiranje kromom utječe na sklonost pojavi krhkosti nakon popuštanja, ali se to može izbjeći dodatnim legiranjem s molibdenom [6,8].

Nikal (Ni)

Nikal je izrazito gamageni element pa proširuje područje austenita te zbog vrlo slabog afiniteta prema ugljiku ne stvara karbide. Legiranjem s niklom može se povisiti žilavost konstrukcijskih čelika kao i korozijska postojanost (uz min. 12 % kroma). Smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost. Zbog ekonomskih razloga, najčešće zbog visoke cijene, nikal se uvijek legira u kombinaciji s drugim legirajućim elementima [6,8].

Molibden (Mo)

Molibdenom kao legirajućim elementom povećava se prokaljivost i čvrstoća čelika, a sprječava pojava visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Iz tog razloga, konstrukcijski čelici sadrže od 0,2 % – 5 % molibdena. Molibden je karbidotvorac pa utječe na sitnozrnatost čelika i na otpornost na trošenje. U kombinaciji s kromom molibden povećava otpornost čelika prema općoj i jamičastoj koroziji. Proširuje područje ferita [6,8].

Mangan (Mn)

Mangan se najčešće koristi kao dezoksidator i desulfurizator tijekom proizvodnje čelika. Zbog velikog afiniteta prema sumporu, mangan stvara sulfid MnS čime se sprječava negativno djelovanje sulfida FeS. Mangan proširuje austenitno područje te se njime povećava prokaljivost čelika, a u nezakaljenim čelicima poboljšava se čvrstoća i žilavost. Dodatak svakih 1 % mangana može dovesti do povišenja granice razvlačenja konstrukcijskih čelika za oko 100 N/mm². Čelici poprimaju austenitnu mikrostrukturu, neovisno o sadržaju ugljika, ukoliko je sadržaj mangana veći od 12 % [6,8].

Titan (Ti)

Titan posjeduje jak afinitet prema kisiku, ugljiku, dušiku i sumporu. Najjači je karbidotvorac. Njegovi karbidi teško se raspadaju pri povišenim temperaturama. Djeluje na sužavanje austenitnog područja. Dodaje se nehrđajućim čelicima kao stabilizator uz tantal i niobij. Oni vežu na sebe ugljik stvarajući manje opasne karbide. Vrlo su jaki karbidotvorci i primjenjuju se za stabilizaciju čelika postojanih na djelovanje kiselina [6,8].

Silicij (Si)

Silicij, jednako kao i mangan djeluje dezoksidirajuće pa se koristi u proizvodnji nehrđajućih čelika. Povećuje čvrstoću, otpornost prema trošenju i granicu razvlačenja. Jako povećuje otpornost prema djelovanju topline pa je neizbježan legirajući element koji se dodaje vatrootpornim čelicima. Silicij ima tendenciju stvaranja oksida što za posljedicu ima smanjenje mogućnosti pojave pora [6,8].

Dušik (N)

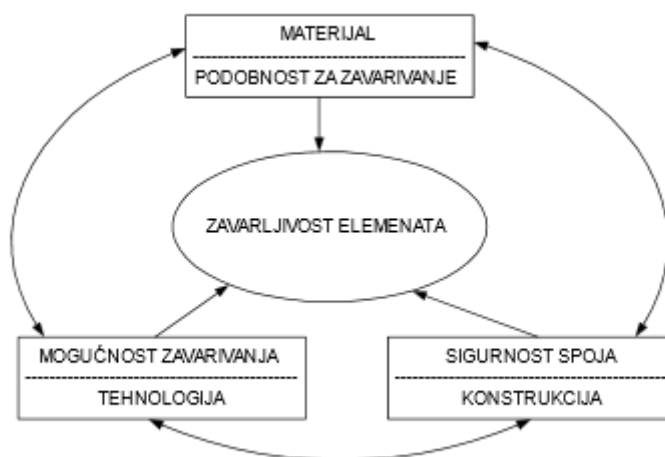
Dušik u nekim slučajevima predstavlja nepoželjni element, ali se i dodaje kao legirajući element austenitnim čelicima, budući da povećava granicu razvlačenja, proširuje austenitno područje čime omogućuje da se njime zamijeni dio skupog nikla. U nelegiranim i niskolegiranim čelicima nije poželjan jer povećava sklonost takvih čelika prema starenju, posebno kod hladno deformiranih čelika. Najčešće se dodaje u količini do 0,25 % [6,8].

Nečistoće

Elementi poput sumpora, fosfora, kisika i vodika u čeliku su gotovo uvijek nečistoće. Pojavljuju se kao nemetalni uključci nastali u procesu proizvodnje čelika, posebno kod postupaka taljenja i ljevanja. Ovi elementi smanjuju žilavost čelika, te nije moguće čeliku povećati čvrstoću. Nečistoće pogoršavaju svojstva čelika pa ih je potrebno što više izbjegavati [6,8].

4. ZAVARLJIVOST

Određeni metalni dio je zavarljiv kada se primjenom određenog postupka zavarivanja može postići kontinuitet metalnog materijala. Zavareni spoj mora u potpunosti odgovarati prihvaćenim kriterijima kako svojim lokalnim karakteristikama, tako i utjecajem na cijelu konstrukciju. Zavarljivost ovisi o materijalu koji se zavaruje, oblikovanju dijelova te o samoj tehnologiji zavarivanja. Međusobna ovisnost ovih parametara prikazana je slikom 5.



Slika 5. Zavarljivost materijala [9]

Materijal je definiran kemijskim sastavom te fizikalnim i mehaničkim svojstvima. U pogledu sigurnosti zavarenog spoja posebna pažnja se posvećuje konstrukcijskom obliku zavarenog spoja, vrstama i veličini naprezanja, debljini elemenata, radnim temperaturama te okolnom mediju. Mogućnost zavarivanja obuhvaća određivanje temperature predgrijavanja, kemijskog sastava, debljine, parametre izvođenja procesa te naknadnu toplinsku obradu. Ne postoji jedinstvena metoda ispitivanja koja bi sveobuhvatno odredila ono što leži iza pojma zavarljivosti. Za ispitivanje i ocjenu zavarljivosti koristi se niz metoda od kojih svaka služi za određivanje određenih svojstava.

Bitan parametar kod zavarljivosti je postotak ugljika u čeliku. Što je postotak ugljika manji zavarljivost je bolja. Jedna od najčešće korištenih formula za izračunavanje ekvivalentnog postotka ugljika [10]:

$$C_{ekv} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10} \quad (1)$$

Znači da će zavarljivost biti tim bolja što je manji %C i što je manji stupanj legiranosti, jer legiranost povisuje prokaljivost. Prihvatljiva vrijednost je $C_{ekv} < 0,4$. Čelici s većim ekvivalentnim sadržajem ugljika zahtijevaju predgrijavanje, čime se postiže sporije ohlađivanje nakon zavarivanja [10].

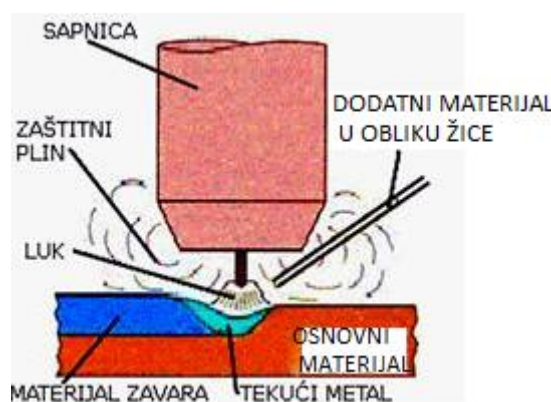
Loša zavarljivost se očituje pogreškama u zavarenim spojevima koje direktno utječu na razne druge parametre kao što su lomovi konstrukcije, deformacije, cijena konstrukcije i sl. Mnoge pogreške nastale zavarivanjem često nastaju zbog pogrešno odabrane tehnologije zavarivanja ili zbog ne znanja samog zavarivača.

5. POSTUPCI ZAVARIVANJA

Prije početka zavarivanja određenih dijelova ili konstrukcija potrebno je proučiti sve detalje vezane uz zavarivanje kao što su npr. vrsta i debljina materijala, kako bi se na temelju tih podataka mogao odabrati adekvatan postupak zavarivanja za određenu konstrukciju. Taj posao odrađuju posebno educirani kadrovi kao npr. europski inženjeri za zavarivanje (EWE). Njima je zadaća pregledati nacrt i tehnologiju zavarivanja te ovjeriti potpisom i pečatom. Prije bilo kakvog zavarivanja potrebno je obaviti temeljitu pripremu. To se prvenstveno odnosi na pripremu površine koja se zavaruje. Površinu je potrebno očistiti od nečistoća te odmastiti. Ukoliko se taj posao ne obavi kako treba moguće su pojave grešaka u zavarenim spojevima. Osnovni čimbenici u izboru postupka zavarivanja debljina materijala, oblik konstrukcije, vrsta čelika, zahtijevana kvaliteta, duljina spojeva, raspoloživo osoblje, veličina serije te postojeća oprema. Postupci korišteni za zavarivanje visokolegiranih čelika su TIG, MIG, REL, plazma, EPP, laser[8].

5.1. TIG postupak

TIG (Tungsten inert gas) postupak je postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivom wolframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Energija potrebna za zavarivanje dobiva se od električnog luka koji se održava između wolframove elektrode i radnog komada. Zavarivati se može s dodatnim materijalom ili bez njega. Na slici 6 je prikazan postupak TIG zavarivanja. Često se koristi kod zavarivanja korijena kada se zahtijeva potpuna penetracija. Koristi se istosmjerna struja s elektrodom na negativnom polu [8].



Slika 6. TIG postupak zavarivanja [11]

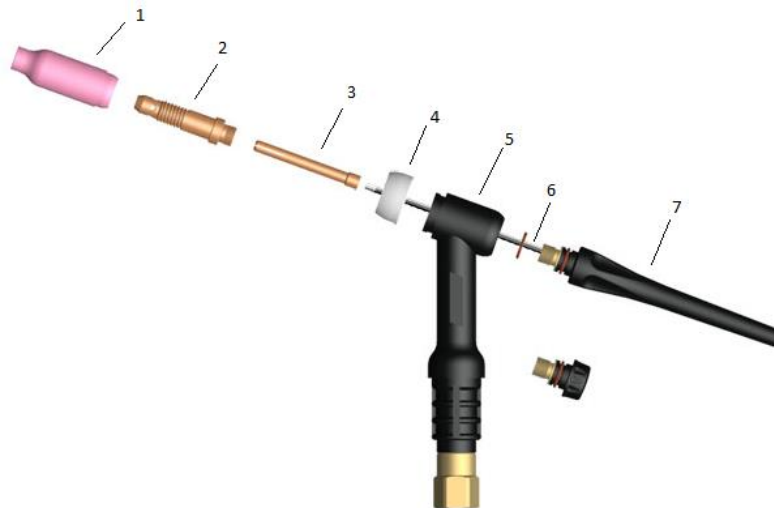
Prednosti:

- zavarivanje u svim položajima,
- zavarivanje raznorodnih metala,
- nema troske,
- nema nepoželjnog prskanja kapljica metala zavora,
- vizualno lijep zavar, gladak, nije potrebno brušenje,
- najkvalitetniji zavareni spojevi.

Nedostaci:

- neekonomičan kod zavarivanja debljih materijala,
- otežan rad na terenu kod jačeg utjecaja vjetra,
- veliki zahtjevi za točnost,
- zahtijeva jako dobru pripremu spoja,
- kvaliteta zavora ovisi o iskustvu zavarivača.

Dio opreme potreban za TIG zavarivanje je izvor električne struje. Izvori mogu biti transformatori, ispravljači i inverteri. Na izvor je potrebno priključiti pištolj za zavarivanje koji se sastoji od nekoliko dijelova prikazanih na slici 7.



Slika 7. Dijelovi TIG pištolja [12]

Dijelovi pištolja:

1 - keramička sapnica 2 – čahura za zatezanje 3 – vodilica wolframa 4 – izolator topline
5 – tijelo pištolja 6 – wolfram elektroda 7 – zaštitna kapa (čep)

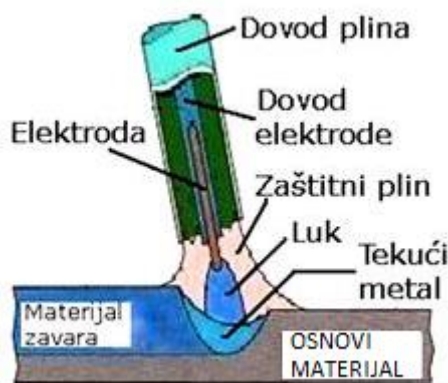
Sapnice za plin su različitih veličina i oblika. Sapnicu određujemo prema mjestu zavarivanja i jakosti struja. Najčešće se izrađuju od keramike ali mogu biti i bakrene. O obliku sapnice ovisi protok zaštitnog plina kod zavarivanja.

Netaljive wolframove elektrode služe za uspostavljanje električnog luka koji tali osnovni, a po potrebi i odadni materijal. Izrađuje se od čistog wolframa ili od wolframa s dodacima od torijevog oksida, cirkonijevog oksida, lantanovog oksida ili cerijevog oksida. Mogu biti različitih promjera (0.5, 1.0, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 6.4, 8.0 mm) i duljina (50, 75, 150, 175, 200 mm) [13].

Zaštitni plinovi koji se najčešće koriste su argon i helij te njihove mješavine. Zadatak im je osigurati talinu od utjecaja atmosfere tijekom zavarivanja. Argon daje stabilniji električni luk ali manju penetraciju za razliku od helija. Količina zaštitnog plina ovisi o struji zavarivanja , vrsti materijala, obliku spoja i o položaju zavarivanja.

5.2. MIG/MAG postupak

MIG/MAG postupak je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnih ili aktivnih plinova. Metalna elektroda i osnovni materijal tale se pod utjecajem električnog luka i sjedinjuju u zavareni spoj. Metalna elektroda u obliku žice spojena je na plus pol istosmjernog izvora struje. MIG/MAG postupak prikazan je slikom 8.



Slika 8. MIG/MAG postupak zavarivanja [11]

Prednosti:

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- velika mogućnost izbora parametara,
- zavarivanje u svim položajima, u radionici i na terenu,
- primjena različitih plinskih mješavina,
- široki raspon debljina,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju.

Nedostaci:

- problemi kod dovođenja žice,
- greške zbog neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja,
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima,
- složeni uređaji.

5.2.1. Prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanja

Način prijenosa metala kod MIG postupka može biti kratkim spojevima, štrcajućim te mješovitim lukom i impulsnim strujama. Način prijenosa metala odabire se ovisno o jakosti struje zavarivanja te o debljini materijala [8].

5.2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima koristi se kod malih promjera žice za zavarivanje i niskih vrijednosti struja zavarivanja. Napon se kreće od 13 V do 21 V, dok su struje zavarivanja od 50 A do 170 A. Glavna značajka je mali unos topline. Period u kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spoja i fazu električnog luka. Kada žica dotakne radni komad napon pada na nulu, a struja počinje eksponencijalno rasti. Do odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizikalnom kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja elektromagnetske sile koja uzrokuje stezanje kapljice i njenog odvajanja. Napon polagano raste zbog povećanja otpora uslijed pojačanog zagrijavanja vrha žice. Porast struje mora biti dovoljno visok da zagrije elektrodu i pomogne kod prijenosa metala ali i dovoljno nizak da smanji štrcanje uzrokovano odvajanjem kapljice rastaljenog metala.

5.2.1.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

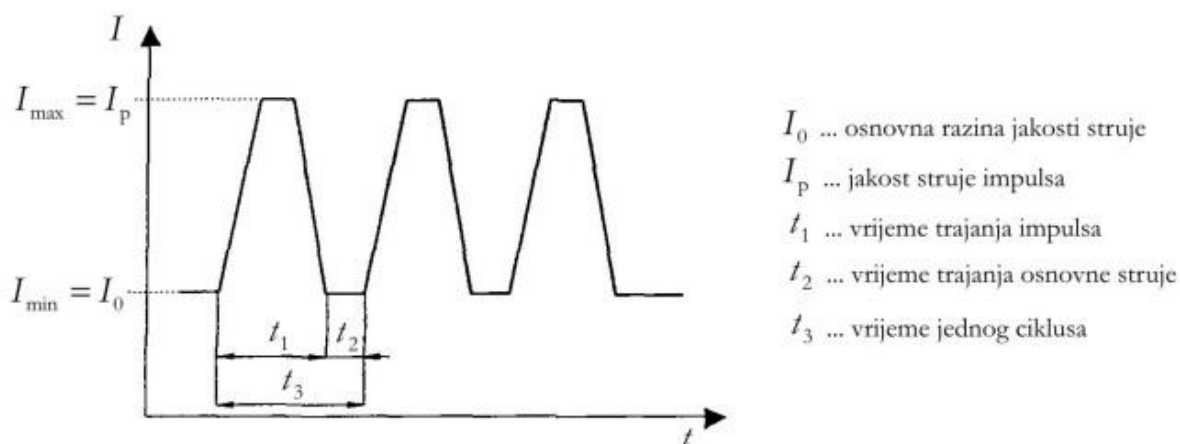
Kod prijenosa metala štrcajućim lukom potrebna je istosmjerna struja s elektrodom na pozitivnom polu. Napon se kreće od 25 V do 40 V, a struje od 200 A pa sve do 600 A. Ovaj način prijenosa metala učinkovit je kod zavarivanja debljih materijala. Zavarivanje u nadglavnom položaju je otežano zbog velike količine depozita pri čemu se formira talina prevelika da površinska napetost spriječi curenje. Štrcajući luk rezultira usmjerenim prijenosom kapljica pod utjecajem velikih elektrolučnih sila, koje su veće od gravitacije. Zbog toga je ovaj način moguće koristiti za zavarivanje u bilo kojoj poziciji. Kapljice su manje od duljine luka pa ne dolazi do kratkog spoja, a i prskanja gotovo da i nema.

5.2.1.3. Prijenos metala prijelaznim lukom

Odvija se također kod istosmjerne struje s elektrodom na pozitivnom polu pri strujama od 170 A do 235 A i naponom od 22 V do 25 V. Kapljice su većeg promjera od promjera elektrode. Električni luk mora biti dovoljno dug da osigura odvajanje kapljice prije nego dotakne talinu. Ako je duljina luka prekratka (niski napon), povećana kapljica može dodirivati radni komad, dođe do kratkog spoja te nastaje štrcanje.

5.2.1.4. Prijenos metala impulsnim strujama

Ovaj način prijenosa metala sličan je prijenosu metala štrcajućim lukom s razlikom u mogućnosti kontrole prijenosa metala. Kod prijenosa metala impulsnim strujama postoje dvije razine struja. Osnovna razina jakosti struje održava električni luk, a struja impulsa omogućuje odvajanje kapljice po svakom impulsu. Struja impulsa viša je od osnovne struje, što je i vidljivo na slici 9. Frekvencija i amplituda impulsa kontrolira razinu energije električnog luka i prema tome brzinu taljenja žice. Vrijeme trajanja impulsa impulsne struje i vrijeme trajanja impulsa osnovne struje čini jedan ciklus. Smanjenjem energije luka i brzine taljenja žice omogućeno je zavarivanje tanjih limova u svim položajima. Prijenos metala impulsnim strujama razvijen je s ciljem smanjenja štrcanja i eliminacije grešaka u zavarenim spojevima. Ovaj način prijenosa metala ima brojne prednosti. Neke od njih su izgled zavarenog spoja, manje deformacije osnovnog materijala, smanjeni unos vodika u zavar, mogućnost zavarivanja u prisilnim položajima.



Slika 9. Impulsna struja [13]

5.2.2. Pištolj za MIG/MAG zavarivanje

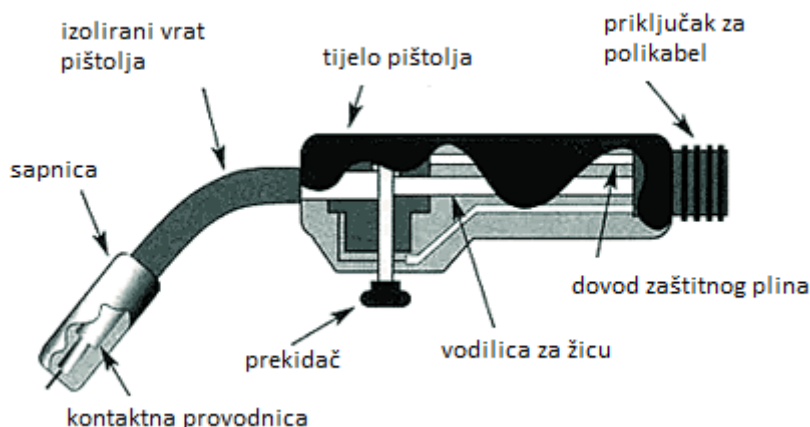
Pištolj za MIG zavarivanje (slika 10) spojen je preko polikabela do izvora struje za zavarivanje. Preko polikabela dolazi zaštitni plin i dodatni materijal u obliku žice do mjesta zavarivanja. Na samom vrhu pištolja se nalazi kontaktna provodnica pomoću koje dolazi do uspostavljanja električnog luka. Pištolji mogu biti hlađeni vodom ako se koriste za zavarivanje velikim strujama.



Slika 10. Pištolj za MIG zavarivanje [14]

Na vrhu pištolja se nalazi metalna sapnica koja služi za usmjeravanje zaštitnog plina. Kao zaštitni plinovi koriste se mješavine plinova argon – helij ili argon – helij – ugljični dioksid. Helij povećava energiju luka i poboljšava kvašenje, dok ugljični dioksid povećava stabilnost električnog luka.

Shematski prikaz pištolja sa sastavnim dijelovima prikazan je slikom 11.



Slika 11. Dijelovi pištolja [15]

Polikabelom dolazi dodatni materijal u obliku žice, zaštitni plin te vodovi za napajanje električnom energijom do pištolja za zavarivanje. Svaki od dijelova pištolja za zavarivanje ima određenu ulogu u procesu zavarivanja. Kontaktna provodnica omogućuje da električna energija dođe do žice za zavarivanje kako bi se omogućilo taljenje žice. Sapnica služi za ravnomjerno raspršivanje zaštitnog plina. Promjer sapnice ovisi o protoku plina i jakosti struje.

Postoje razne izvedbe pištolja. Ovisno o načinu zavarivanja (ručno, automatsko...), jakosti struje, protoku plina pištolji mogu biti hlađeni vodom ili zrakom.

5.2.3. Dodavač žice

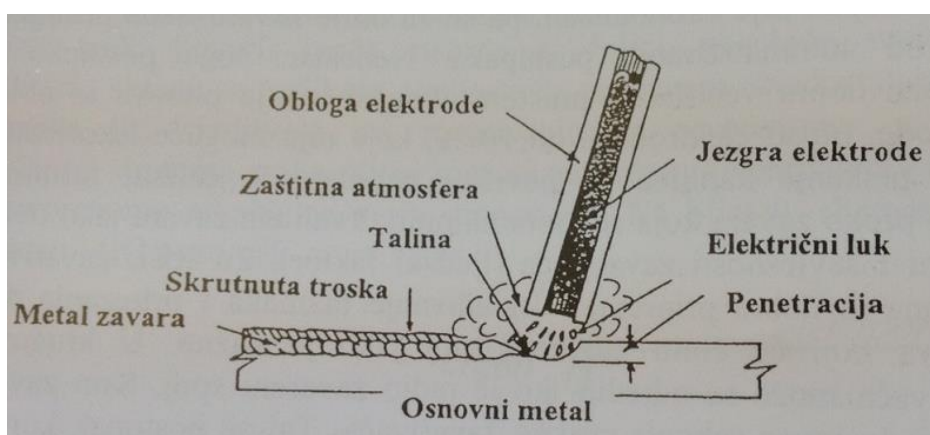
Većina sustava za dobavu žice pogonjena je elektromotorom koji omogućuju konstantnu dobavu žice do mjesta zavarenog spoja. Ovisno o promjeru žice, potrebno je i mijenjati pogonske valjke koji omogućuju gibanje žice. Žica se giba brzinom od 2 m/min do 20 m/min. Kod dobave žice na veće udaljenosti može doći do problema da je elektromotor preslab pa ne može gurati žicu. Za tu primjenu se koriste push-pull sustavi koji imaju valjke na pištolju pa je moguće žicu vući prema pištolju. Na slici 12 je prikazano kako izgleda sustav za dobavu žice. Potpuno zatvoreni mehanizam za dodavanje žice i standardni pokrivač koluta, osigurava zaštitu od prašine i nečistoća. U visokoproduktivnim automatiziranim sustavima, brzina dovođenja žice može iznositi i do 30,5 m/min, stoga je žica namotana na velike kaleme koje treba rijede mijenjati.



Slika 12. Sustav za dobavu žice [16]

5.3. REL postupak

REL (ručno elektrolučno zavarivanje) postupak je postupak ručnog elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom. Pri ručnom zavarivanju između elektrode i radnog komada stvara se električni luk u kojem se električna energija pretvara u toplinsku i svjetlosnu. Dobivena toplinska energija omogućuje taljenje dodatnog i osnovnog materijala. Zavarivač drži držač elektrode i prilagođava duljinu luka i brzinu zavarivanja. Shemamatski prikaz REL postupka prikazan je slikom 13.



Slika 13. REL postupak zavarivanja [8]

Prednosti:

- jeftina i jednostavna oprema,
- zavarivanje u svim položajima,
- zavarivanje svih debljina i materijala,
- rad u radionici i na terenu,
- jednostavno podešavanje parametara.

Nedostaci:

- potrebna ventilacija prostora,
- loša iskoristivost dodatnog materijala,
- slaba mogućnost automatizacije,
- stvaranje troske,
- ne ekonomičan za debljine veće od 25 mm.

Oprema za zavarivanje se sastoji od izvora struje te držača elektroda i mase. Izvori struje mogu biti transformatori, ispravljači, inventori i generatori.

Zaštitu električnog luka i zaline zavara od okolnog zraka obavljaju plinovi i troska, koji nastaju pri taljenju i kemijskim reakcijama obloge elektrode. Zadaća obloge je i da stabilizira električni luk, legira i dezoksidira talinu zavara. Elektrode za zavarivanje visokolegiranih čelika mogu biti bazične i rutilne. Visokolegirane elektrode s rutilnom oblogom mogu se upotrebljavati na istosmjernoj i izmjeničnoj struji, a bazične samo na istosmjernoj struji. Kemijski sastav metala koji se dobiva taljenjem tih elektroda uglavnom odgovara kemijskom sastavu žice koja se koristila kao jezgra obložene elektrode. Legiranjem iz obloge kod tih elektroda nadoknađuju se gubici legirajućih elemenata zbog isparavanja ili njihova prijelaza u trosku [8].

5.4. Plazma postupak

Plazma postupak se razvio iz TIG postupka. Mlaz plazme (slika 14) je zapravo mlaz vrućih plinova koji na površini predmeta proizvodi koncentriranu gustoću snage do 500 W/mm². U plinu koji prolazi električnim lukom dolazi do disocijacije i ionizacije zbog energije električnog luka. Temperatura u električnom luku vrlo je visoka jer je velika koncentracija energije na uskom području što postižemo oblikom sapnice. Plin koji je pretvoren u plazmu izlazi iz sapnice velikom brzinom, prenoseći energiju preuzetu iz električnog luka na osnovni materijal. Za stvaranje plazme električni se luk uspostavlja između volframove elektrode i osnovnog materijala.



Slika 14. Plazma zavarivanje [18]

Kod plazma postupka zavarivanja koriste se tehnika taljenja i tehnika protaljivanja (efekt ključanice). Kod tehnike protaljivanja plazmeni mlaz protaljuje čitavu debljinu osnovnog materijala stvarajući u njemu otvor oblika ključanice, a zavareni spoj nastaje usljed površinske napetosti zbog koje rastaljeni materijal zatvara taj nastali otvor.

Ključni utjecaj na stabilnost i brzinu procesa te na kvalitetu imaju tehnički plinovi koji se koriste u procesu. Oni mogu biti plazmeni ili zaštitni. Da bi proces zavarivanja ili rezanja bio što bolji potreban je pravilan odabir plazmenog plina ili mješavine plinova za određeni materijal. Pri odabiru plina glavnu ulogu imaju njegova fizička svojstva, kao što su ionizacija i energija disocijacije, toplinska vodljivost, atomska težina i kemijska reaktivnost. Plinovi koji se koriste su zrak, dušik, argon, helij, vodik te njihove mješavine.

Prednosti:

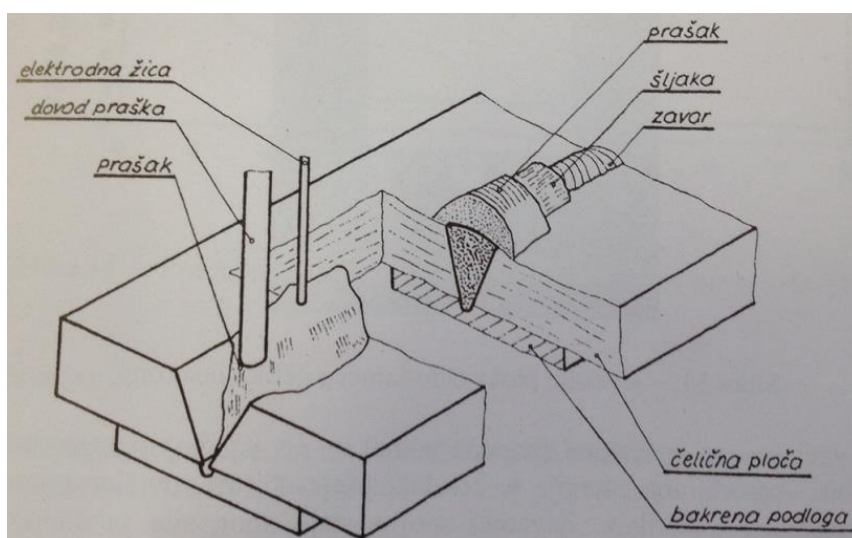
- mogućnost automatizacije,
- manje deformacije osnovnog materijala,
- velika brzina zavarivanja,
- mogućnost potpunog protaljivanja u jednom prolazu.

Nedostaci:

- skupa oprema i održavanje,
- otežano rukovanje kod ručnog postupka,
- obavezno vodeno hlađenje pištolja,
- održavanje točnog razmaka između vrha elektrode i sapnice.

5.5. EPP postupak

EPP postupak je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom pod zaštitom praška. Nevidljivi električni luk nalazi ispod sloja praška između elektrode i radnog komada. Elektroda je u obliku žice te se kontinuirano dovodi. Prostor je okružen tekućom troskom koja nastaje topljenjem praška. Zadatak praška nije samo zaštita rastaljenog i očvrnutog materijala zavara od zraka već i oblikovanje površine zavara, sprječavanje prebrzog hlađenja te poboljšanje stabilnosti električnog luka. Shematski prikaz EPP postupka prikazan je slikom 15 [8].



Slika 15. EPP postupak zavarivanja [8]

Oprema se sastoji od izvora električne struje koji su najčešće DC izvori, dodavača žice i traktora.

Elektrode koje se koriste mogu biti u obliku žice (promjera 1.6, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0 mm) ili u obliku trake debljine 0,5 mm (širine 60, 90, 120 i 200 mm).

Prednosti:

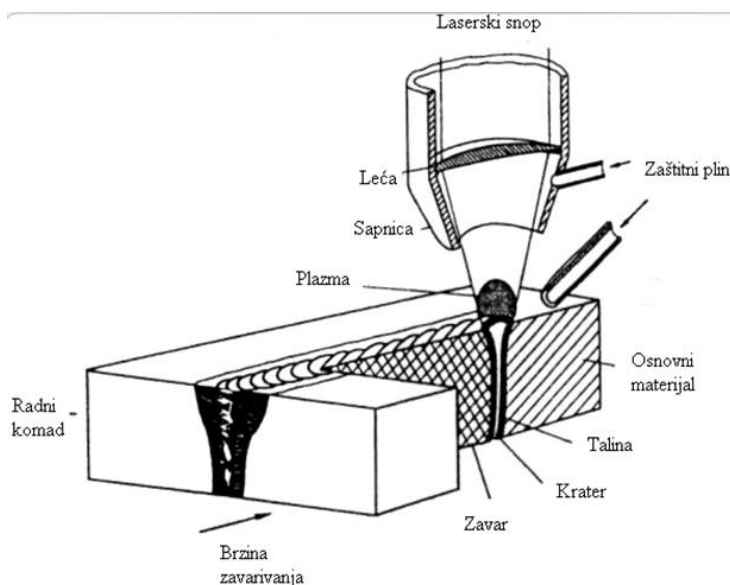
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- mali gubici, visoka iskoristivost,
- električni luk nije vidljiv,
- automatski postupak,
- nema štrcanja,
- visoka učinkovitost.

Nedostaci:

- nije moguće zavarivanje u prisilnim položajima,
- potrebni posebni uvjeti skladištenja praška,
- zbog velikih dimenzija traktora potrebno produženje ulaz/izlaz,
- složeniji uređaji,
- primjenjiv za deblje materijale.

5.6. Zavarivanje laserom

Laser je svjetlosni oscilator, odnosno generator koherentnog zračenja. Koristi se za zavarivanje tanjih komada. Kod zavarivanja laserom talina se ne ispuhuje, nego štiti plinom. Zvareni spoj nastaje zbog sila površinske napetosti koje osiguravaju da talina teče oko kratera. Najčešće se koriste inertni plinovi argon i helij za zaštitu taline i skrutnutog materijala [8]. Shematski prikaz zavarivanja laserom prikazan je na slici 16.



Slika 16. Lasersko zavarivanje [8]

Prednosti:

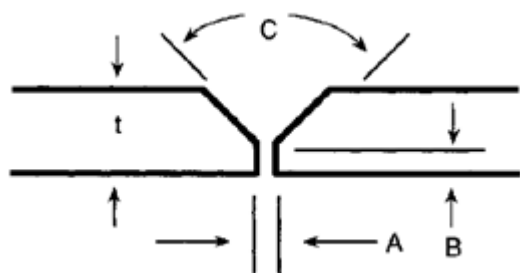
- velika brzina zavarivanja,
- mali unos energije,
- visoka i ujednačena kvaliteta zavora,
- veliki omjer penetracije i širine zavora,
- vrlo mala ili nikakva naknadna obrada komada.

Nedostaci:

- visoki investicijski troškovi,
- visoki zahtjevi točnosti pozicioniranja,
- posebni sigurnosni zahtjevi,
- laserski izvor nije prenosan,
- mali stupanj iskorištenja.

6. PRIPREMA SPOJEVA

Postupci rezanja koji se koriste kod rezanja visokolegiranih čelika su piljenje i rezanje mlazom abraziva, strojno, plazma. Sljedećim slikama prikazane su neke vrste pripreme spojeva.



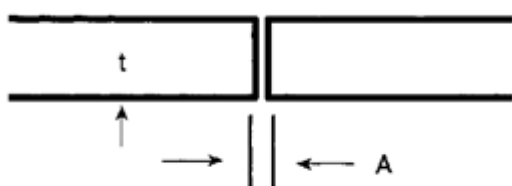
Max $t = 12.7 \text{ mm}$

$A = 0.8 \text{ mm min, } 2.3 \text{ mm max}$

$B = 1.6 - 2.4 \text{ mm}$

$C = 60^\circ - 80^\circ$

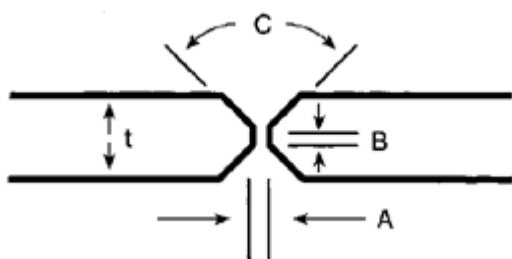
Slika 17. "V" spoj za lim i ploču [21]



Max $t = 3.2 \text{ mm}$

$A = 0.8 \text{ mm min, } 2.3 \text{ mm max}$

Slika 18. "T" spoj za lim [21]



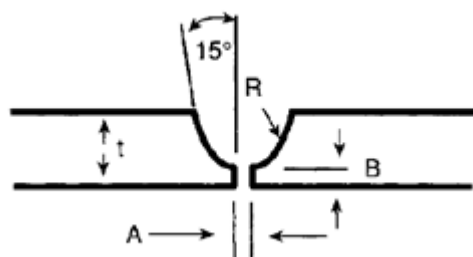
Max $t = 12.7 \text{ mm}$

$A = 0.8 \text{ mm min, } 2.3 \text{ mm max}$

$B = 1.6 - 2.4 \text{ mm}$

$C = 60^\circ - 80^\circ$

Slika 19. Obostrani "V" spoj za ploču [21]



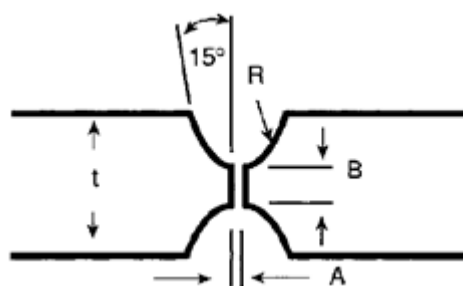
$t = 19 \text{ mm i više}$

$A = 1.6 \text{ mm min, } 3.2 \text{ mm max}$

$B = 1.6 - 2.4 \text{ mm}$

$R = 6.4 \text{ mm min}$

Slika 20. Jednostrani "U" spoj za ploču [21]



$t = 19 \text{ mm i više}$

$A = 1.6 \text{ mm min, } 3.2 \text{ mm max}$

$B = 1.6 - 2.4 \text{ mm}$

$R = 6.4 \text{ mm min}$

Slika 21. Obostrani "U" spoj za ploču [21]

Ovisno o debljini materijala koji se zavaruje odabire se adekvatna priprema spoja. Priprema spoja mora biti točna kako bi kasnije zavareni spoj bio bez grešaka. Upravo zbog loše pripreme nastaje mnogo grešaka u zavarenim spojevima.

7. ZAŠTITNI PLINOVİ

Tijekom bilo kojeg procesa zavarivanja, kisik i drugi atmosferski plinovi mogu reagirati s rastaljenim metalom zavarâ uzrokujući pogreške koje oslabljuju zavareni spoj. Osnovna funkcija zaštitnog plina je zaštititi talinu od utjecaja atmosfere. Svaki plin ima određeno fizikalno svojstvo kojim utječe na brzinu zavarivanja, penetraciju, mehanička svojstva, izgled, boju i oblik zavarâ te stabilnost električnog luka [22].

Izbor zaštitnog plina bazira se na znanju o primjeni zaštitnih plinova te na njihovom sveukupnom utjecaju na proces zavarivanja [23]. Vrste te primjena zaštitnih plinova prikazana je na slici 22.

Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav [%]						Postupak po HRN EN 14610	Primjena
		Ar	He	O ₂	CO ₂	H ₂	N ₂		
Argon specijal 4.8	I1	100						TIG/MIG	ΔO
Helij 4.6	I2		100					TIG/MIG	Δ
Aluline He90	I3	10	90					TIG/MIG	Δ
Aluline He70	I3	30	70					TIG/MIG	Δ
Aluline He50	I3	50	50					TIG/MIG	Δ
Aluline He30	I3	70	30					TIG/MIG	Δ
Aluline He15	I3	85	15					TIG/MIG	Δ
Aluline N	Z	Rest					0,015	TIG/MIG	Δ
Aluline He15 N	Z	Rest	15				0,015	TIG/MIG	Δ
Aluline He30 N	Z	Rest	30				0,015	TIG/MIG	Δ
Aluline He50 N	Z	Rest	50				0,015	TIG/MIG	Δ
Inoxline H2	R1	98				2		TIG	O
Inoxline H5	R1	95				5		TIG	O
Inoxline H7	R1	92,5				7,5		TIG	O
Inoxline N1	N2	98,75					1,25	TIG	O
Inoxline N2	N2	97,5					2,5	TIG	O
Inoxline He15 N1	N2	83,75					1,25	TIG	O
Inoxline He3 H1	R1	95,3	3			1,5		TIG	O
Inoxline X2	M13	98		2				MAG M	O
Inoxline C2	M12	97,5			2,5			MAG M	O
Inoxline C3 X1	M14	96		1	3			MAG M	O
Inoxline He15 C2	M12	83	15		2			MAG M	O
Inoxline He30 H2 C	Z	Rest	30		0,12	2		MAG M	O
Ferroline C8	M20	92			8			MAG M	X
Ferroline C18	M21	82			18			MAG M	X
Ferroline C25	M21	75			25			MAG	X
Ferroline X4	M22	96		4				MAG M	X
Ferroline X8	M22	92		8				MAG M	X
Ferroline C5 X5	M23	90		5	5			MAG M	X
Ferroline C6 X1	M24	93		1	6			MAG M	X
Ferroline C12 X2	M24	86		2	12			MAG M	X
Ferroline He20 C8	M20	72	20		8			MAG M	X
Tehnički ugljični dioksid	C1				100			MAG M	X
Formir plin (N ₂ -H ₂ -mješavine)	N5					5-25	95-75	zaštita korijena	ΔOX

Δ Aluminij i neželjezni materijali O Visokolegirani čelici i čelici na bazi Ni X Nelegirani i niskolegirani čelici

Slika 22. Zaštitni plinovi za zavarivanje i rezanje [24]

Tablicom 3 prikazana su svojstva zaštitnih plinova prema normi HRN EN ISO 14175.

Tablica 3. Svojstva zaštitnih plinova [23]

Tip plina	Kemijski simbol	Svojstva kod 0°C i 1,013 bar (9,101 MPa)		Reakcija kod zavarivanja
		Gustoća (zrak=1,239) kg/m ³	Relativna gustoća prema zraku	
Argon	Ar	1,784	1,380	Inertan
Helij	He	0,178	0,138	Inertan
Ugljični dioksid	CO ₂	1,977	1,529	Oksidirajući
Kisik	O ₂	1,429	1,105	Oksidirajući
Dušik	N ₂	1,251	0,968	Nereaktivan
Vodik	H ₂	0,090	0,070	Reducirajući

Svaki zaštitni plin spada u određenu grupu plinova te mu pripada određena oznaka. Prema normi HRN EN ISO 14175 oznake su sljedeće:

- I – inertni plinovi i inertne mješavine,
- M1, M2, M3 – oksidirajuće mješavine koje sadrže kisik i/ili ugljični dioksid,
- C – jako oksidirajući plinovi i mješavine,
- R – reducirajuće mješavine,
- N – slabo reaktivni plinovi ili reducirajuće mješavine, sadrže dušik,
- O – kisik,
- Z – mješavine koje sadrže komponente koje nisu nabrojane na slici 22 [23].

7.1. Argon

Argon je bezbojni plemeniti plin bez mirisa, teži od zraka. Najvažnije kemijsko svojstvo mu je inertnost. Ovo svojstvo ga svrstava u red idealnih zaštitnih plinova, čak i kod temperatura koje su uobičajene u metalurgiji i kod zavarivanja električnim lukom. Nije toksičan no može istisnuti kisik potreban za disanje. Koristi se za zavarivanje visokolegiranih i nelegiranih čelika te kod zavarivanja aluminija.

Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod zavarivanja. 1.4 puta je teži od zraka te izlaskom iz sapnice potiskuje zrak i dobro štiti rastaljeni metal što također doprinosi potrebi

za manjim protokom prilikom zavarivanja. U odnosu na helij, argon ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom čime se dobiva manja penetracija [24, 25].

7.2. Helij

Helij je plin bez boje, okusa i mirisa. Tehnički se dobiva iz zemnih plinova. Koristi se u zavarivanju gdje je potreban velik unos topline čime omogućava veću žilavost taline, veću dubinu provara i veću brzinu zavarivanja. U usporedbi s argonom, cijena mu je dosta veća te se zbog toga rjeđe koristi. Helij zahtijeva dva ili tri puta veći protok od argona da osigura istu zaštitu. Posjeduje slabiju ionizacijsku sposobnost od argona te zahtijeva veći napon uz konstantne ostale parametre. Helij uzrokuje probleme kod uspostavljanja električnog luka i daje više štrcanja u usporedbi s argonom te daje širok oblik penetracije [24, 25].

7.3. Ugljični dioksid

Ugljični dioksid je bezbojni plin, bez okusa i mirisa, ne gori. Dijelom se dobiva iz prirodnih izvora, a dijelom iz industrijskih otpadnih plinova. Glavne prednosti korištenja ugljičnog dioksida kod MAG zavarivanja su viša brzina zavarivanja, veća penetracija i niža cijena. Kod zavarivanja visokolegiranih čelika ugljični dioksid se koristi u mješavini s argonom i helijem jer ostvaruje izvrsnu penetraciju. Koristi se kod prijenosa metala kratkim spojevima ili prijelaznim lukom [24, 25].

7.4. Plinske mješavine

U počecima uvođenja postupka zavarivanja u atmosferi zaštitnog plina uobičajeno je bilo samo nekoliko plinova, najčešće argon kod TIG i MIG postupka te ugljični dioksid kod MAG postupka zavarivanja. Danas uglavnom dominiraju mješavine plinova koje imaju pozitivan utjecaj na kvalitetu i izgled zavarenog spoja. Osim prethodno navedenih plinova, koriste se i plinovi kisik, dušik, vodik.

Mješavina argona i 50 % do 75 % helija povećava napon električnog luka te se koristi za zavarivanje aluminija, magnezija i bakra jer veći unos topline smanjuje efekt toplinske vodljivosti tih materijala. Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava jednog i drugog plina.

Dodavanjem ugljičnog dioksida argonu znatno se poboljšava penetracija, pa se za ovu mješavinu brzine zavarivanja mogu povećati. Te mješavine najčešće se koriste kod zavarivanja ugljičnih i niskolegiranih čelika s postotkom ugljičnog dioksida do 20 %. Ar-CO₂ mješavine koriste se kod prijenosa metala kratkim spojevima, ali su također primjenjive kod prijenosa štrcajućim lukom i impulsnim strujama.

Dodatkom 1% do 9% kisika u mješavinu s argonom povećava se stabilnost luka i penetracija. Štrcanje metala je minimalno te je smanjena pojava oksidacije [24, 25].

8. EKSPERIMENTALNI DIO

8.1. Uvod

Visokolegirani čelici su pronašli primjenu u mnogim granama industrije. Svaki dio opreme ili konstrukcije od visokolegiranog čelika je sastavljen od više dijelova koji su međusobno spojeni zavarivanjem. Jedan od parametara koji utječe na kvalitetu zavarenog spoja je i zaštitni plin koji se koristi tijekom zavarivanja. Upravo je i cilj ovog eksperimentalnog dijela vidjeti kako zaštitni plin utječe na izgled i dimenzije zavara.

Eksperimentalni dio rada provodi se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Laboratoriju za zavarene konstrukcije.

Na pripremljenim uzorcima potrebno je postupkom navarivanja dobiti zadovoljavajuće parametre koji će se kasnije koristiti i za kutni spoj limova. Zavaruje se ukupno 18 uzoraka, posebno za svaki plin i unos topline. Postupak se ponavlja za navarivanje i kutni spoj limova. Nakon zavarivanja izrezuju se uzorci na kojima se radi makroizbrusak te slijedi ocjenjivanje kvalitete zavarenog spoja s obzirom na zaštitni plin i unos topline.

U tu svrhu definiran je plan pokusa prikazan tablicom 4.

Tablica 4. Plan pokusa

Plan pokusa	Struja zavarivanja [A]		
Zaštitni plin	130	170	210
M12	1.1	2.1	3.1
M13	1.2	2.2	3.2
R1	1.3	2.3	3.3

Brojevi od 1.1 do 3.3 označavaju uzorke ovisno o zaštitnom plinu i jakosti struje zavarivanja.

8.2. Zavarivanje uzoraka

8.2.1. Osnovni materijal

Eksperiment se provodi na čeliku oznake 1.4301 (norma HRN EN ISO 10216-5) čiji je kemijski sastav prikazan tablicom 5 [26].

Tablica 5. Kemijski sastav čelika 1.4301

Oznaka čelika	C _{max}	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	N	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	Ostali
X5CrNi18-10 1.4301	0,07	≤1,00	≤2,00	0,04	0,015	≤0,11	17-19,50	–	–	–	8,00-10,50	–	–

Čelik 1.4301 prema normi HRN EN ISO 15608 spada u grupu 8.1 koju čine austenitni čelici s udjelom kroma manjim od 19 % [27].

Mehanička svojstva čelika prikazana su tablicom 6 [26].

Tablica 6. Mehanička svojstva čelika 1.4301

Granica razvlačenja R_e (N/mm ²)	Vlačna čvrstoća R_m (N/mm ²)
200	500-700

8.2.2. Dodatni materijal

Dodatni materijal koji se koristi je žica LINCOLN MIG-309LSi promjera 1.2 mm. Prema normi HRN EN ISO 14343-2009 materijal ima oznaku G 23 12 Lsi te se sastoji od komponenata prikazanim u tablici 7 [28].

Tablica 7. Kemijski sastav žice MIG-309LSi

Oznaka materijala	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Nb	Ostali
23 12 L Si 309LSi	0,03	0,65-1,2	1,0-2,5	0,03	0,02	22,0-25,0	11,0-14,0	0,5	–	0,5	–	–

Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su tablicom 8 [28].

Tablica 8. Mehanička svojstva žice MIG-309LSi

Granica razvlačenja R_e (N/mm ²)	Vlačna čvrstoća R_m (N/mm ²)
320	510

Žica je pakirana u kolut mase 15 kg. Preporučeni zaštitni plinovi za ovu vrstu žice su mješavine 98 % Ar/2 % O₂ ili 90 % He/7,5 % Ar/2,5% O₂.

8.2.3. Zaštitni plin

Za provedbu eksperimenta potrebna su tri zaštitna plina. Prema normi HRN EN ISO 14175 korištene su mješavine:

- M12,
- M13,
- R1 [23].

M12

Prema normi mješavina M12 se sastoji od 0,5 % do 5 % CO₂ dok je ostalo argon. U ovom slučaju koristi se mješavina „Inoxline C2“ koja se sastoji od 2,5 % CO₂ i 97,5 % Ar.

M13

Prema normi mješavina M13 se sastoji od 0,5 % do 3 % O₂ dok je ostatak argon. U ovom slučaju koristi se mješavina „Inoxline X3“ koja se sastoji od 3 % O₂ i 97 % Ar.

R1

Prema normi mješavina R1 sastoji se od 0,5 % do 15 % H₂ dok je ostatak argon. U ovom slučaju koristi se mješavina „Inoxline He3H1“ koja se sastoji od 3 % He, 1 % H₂ i 96 % Ar.

8.2.4. Uređaj za zavarivanje i parametri

Uređaj za zavarivanje koji se koristi kod zavarivanja uzoraka je „Varstroj WB-P400 (w)“ (slika 23).



Slika 23. Uređaj za zavarivanje Varstroj WB-P400 (w)

Na upravljačkoj ploči uređaja za zavarivanje potrebno je odabrati određene postavke prije početka zavarivanja. Neke od tih postavaka su definirati vrstu osnovnog materijala, promjer dodatnog materijala, vrstu zaštitnog plina, način prijenosa metala.

Parametri

Cilj eksperimenta je prikazati utjecaj zaštitnog plina na geometriju i izgled zavarenog spoja. Tako su parametri dobiveni kod navarivanja primjenjeni i kod zavarivanja kutnog spoja što je i prikazano u tablici 9, kako bi se mogla razmotriti ista stanja pokusa.

Unos topline računa se prema formuli [29]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3}, kJ/mm \quad (2)$$

U- napon [V] I – struja [A] v – brzina zavarivanja [mm/s] k- toplinski koeficijent (0,8 za MAG)

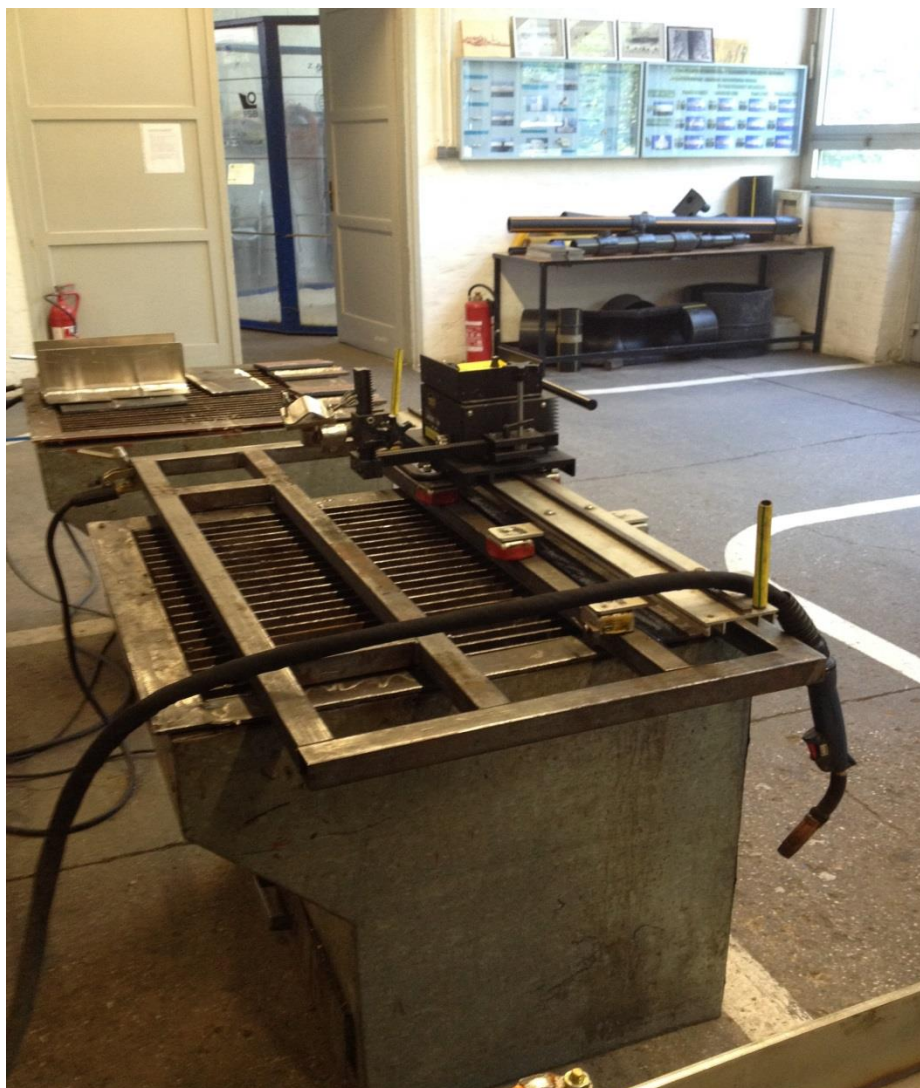
Tablica 9. Parametri zavarivanja

PARAMETRI		Zaštitni plin					
		M12	M13	R1	M12	M13	R1
		Navarivanje			Zavarivanje		
Nagib pištolja [°]		11			45		
Slobodni kraj žice [mm]		16					
Protok plina [l/min]		15					
Struja zavarivanja 130 A	Napon [V]	22					
	Brzina zavarivanja [cm/min]	25			22		
	Brzina žice [m/min]	5,5					
	Unos topline [kJ/cm]	5,5					
Struja zavarivanja 170 A	Napon [V]	23,8					
	Brzina zavarivanja [cm/min]	27					
	Brzina žice [m/min]	7,1					
	Unos topline [kJ/cm]	7,2					
Struja zavarivanja 210 A	Napon [V]	26					
	Brzina zavarivanja [cm/min]	30					
	Brzina žice [m/min]	9					
	Unos topline [kJ/cm]	8,7					

Brzina zavarivanja povećava se s povećanjem struje. Većim unosom topline povećava se depozit materijala te talina, ako je brzina ostala nepromijenjena, „prestigne“, tj dođe ispred pištolja što može uzrokovati određene pogreške u zavarenom spoju.

Održavanje konstantne brzine zavarivanja omogućeno je uz pomoć „Bugo“ uređaja na kojem se namjesti željena brzina koja ostaje konstantna tijekom zavarivanja. Radno mjesto zajedno s uređajem za vođenje pištolja prikazano je na slici 24.

Prijenos metala je impulsnim strujama, a tehnika rada je desna.



Slika 24. Radno mjesto

U tablici 10 prikazane su oznake pojedinih uzoraka ovisno o zaštitnom plinu i jakosti struje zavarivanja koje se koriste u nastavku rada.

Tablica 10. Oznake uzoraka

Zaštitni plin	Struja zavarivanja [A]		
	130	170	210
M12	1.1	2.1	3.1
M13	1.2	2.2	3.2
R1	1.3	2.3	3.3

8.2.5. Priprema uzoraka

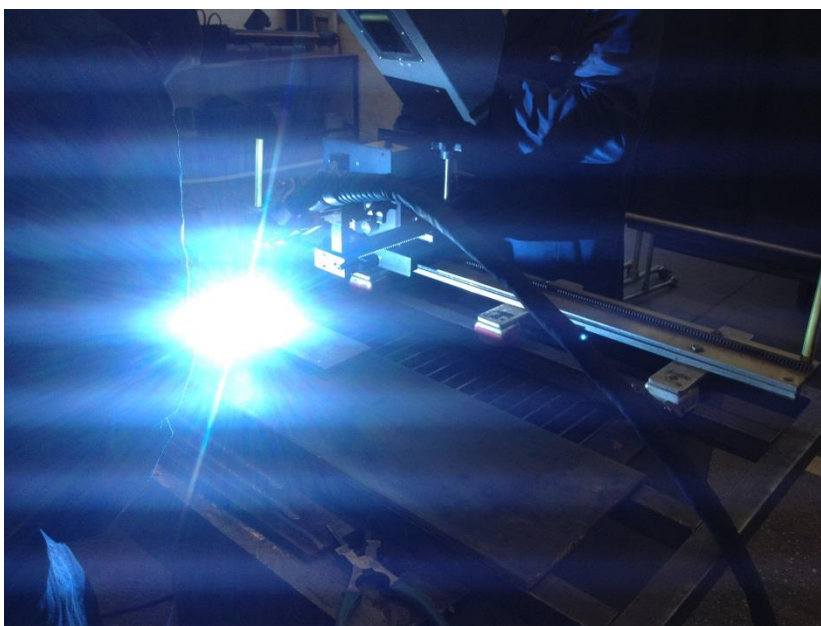
Iz plosnog profila dimenzija 6000x100x10 mm izrezani su uzorci duljine 350 mm. Ukupno je potrebno 16 uzoraka. Nakon rezanja, uzorcima je postupkom glodanja poravnata jedna strana koja se zavaruje kako bi se dobila što bolja priprema spoja. Prije početka zavarivanja uzorci su bili očišćeni etilnim alkoholom kako bi se uklonile eventualne nečistoće i masnoće iz mjesta zavarenog spoja koje mogu uzrokovati pogreške u zavarenom spoju (slika 25).



Slika 25. Čišćenje i odmašćivanje uzoraka

8.2.6. Navarivanje

Postupak navarivanja provodio se automatskim „BUGO“ uređajem. Podešenja nagiba i položaja pištolja za sve uzorke bio je konstantan zato što razmak i nagib, ukoliko se razlikuju, mogu utjecati na rezultat zavarivanja. Navarivanje (slika 26) se vrši u tri prolaza po uzorku od kojih je za svaki jednak unos topline ali se mijenja zaštitni plin.



Slika 26. Navarivanje uzorka 1.1

Slika 27 prikazuje uzorak navara strujom od 130 A i tri različita zaštitna plina. Uzorak 1.1 kod kojeg je zaštitni plin M12 (Ar/CO₂) ima vidljivo najširi zavar, dok je uzorak 1.2 kod kojeg je zaštitni plin M13 (Ar/O₂) nešto uži. Za jednaki unos topline najuži zavar dobije se navarivanjem u zaštitnoj atmosferi plina R1 (Ar/He/H₂) kod kojeg se primjećuje lagano štrcanje kapljica metala zavora uz zacrnjenje okolne površine. Na navarima 1.1 i 1.2 također je došlo do promjene boje oko navara ali ne toliko crno i široko oko navara kao kod uzorka 1.3.



Slika 27. Navarivanje 130 A

Slika 28 prikazuje uzorak navara strujom 170 A i tri različita zaštitna plina. Širina navara je veća nego u prethodnom slučaju zbog veće brzine dodavanja žice i većeg unosa topline. Širina uzorka 2.1 je najveća, dok je širina uzorka 2.3 najuža. Također se na uzorku 2.3 vidi jako zacrnjenje okolne površine i bobice nastale štrcanjem metala zavarara kao i u prethodnom slučaju sa zaštitnim plinom R1. Na uzorcima 2.1 i 2.2 vidljivo je da je površina oko navara malo potamnila, isto kao i u prethodnom slučaju.



Slika 28. Navarivanje 170 A

Slika 29 prikazuje uzorak navara strujom 210 A i također tri različita zaštitna plina. Odnos širina navara je kao i u prethodnim slučajevima. Povećanjem struje povećava se i širina navara. Na uzorcima 3.1 i 3.2 opet je vidljiva promjena boja površine oko navara, malo tamnije nego u prethodnim slučajevima. Na uzorku 3.3 vidljivo je dosta štrcanja metala te jako zacrnjenje površine oko navara.



Slika 29. Navarivanje 210 A

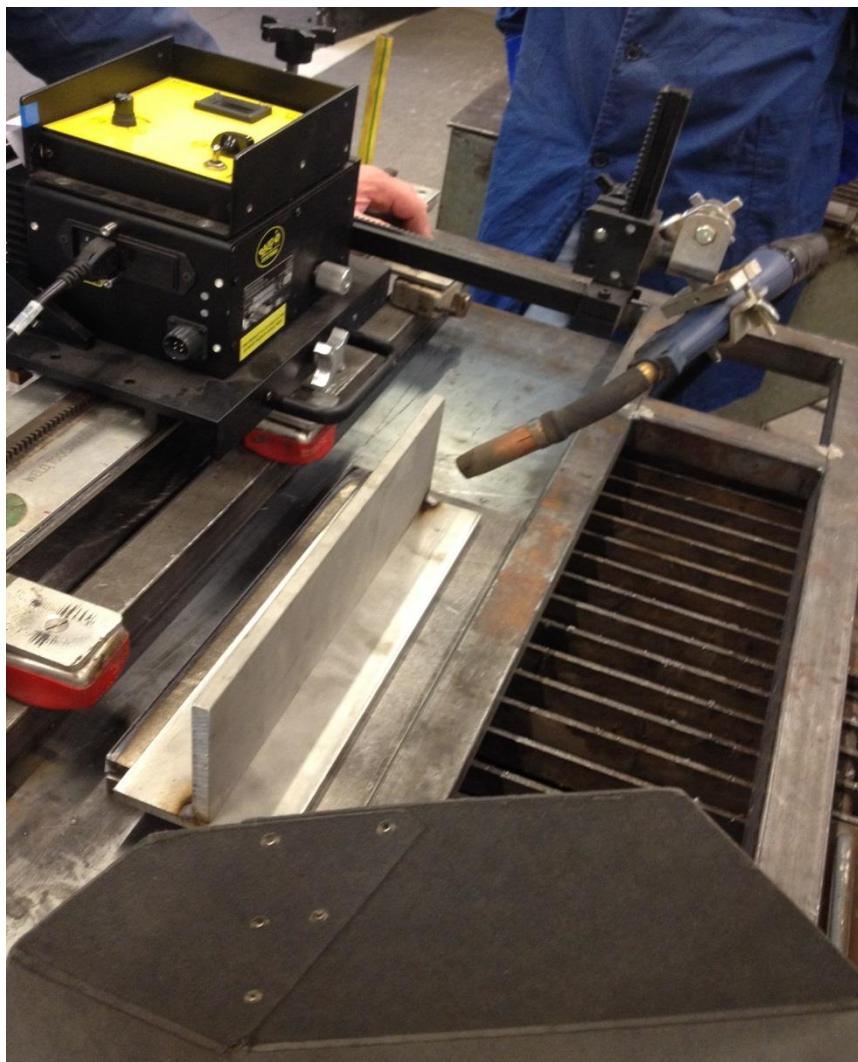
Nakon svakog prolaza infracrvenim termometrom izmjerena je međuprolazna temperatura koja ne smije biti viša od 50 °C. Međuprolazna temperatura iznosila je manje od 50 °C. Međuprolazna temperatura utječe na mehanička svojstva i mikrostrukturu zavora. Visoke međuprolazne temperature smanjuju čvrstoću zavora. Mjerenje temperature prikazano je slikom 30.



Slika 30. Mjerenje međuprolazne temperature

8.2.7. Kutni spoj

Za kutni spoj uzoraka također je potrebno namjestiti pištolj za zavarivanje u držač na uređaju za vođenje. Ovaj put, pištolj se postavlja pod kutem od 45° kako bi žica za zavarivanje točno udarala u spoj uzoraka (slika 31).



Slika 31. Prikaz postava eksperimentalnog rada za zavarivanje

Nakon namještanja uređaja, dvije ploče se međusobno postavljaju u okomiti položaj te se zajedno pripoje. Nakon toga se može zavarivati.

Na slici 32 prikazan je uzorak 1.1. Vidljiva je uska zona zacrnjenja sa gornje strane zavora, dok je sa donje strane vidljiva samo promjena boje osnovnog materijala uslijed zagrijavanja. Došlo je do vrlo malo štrcanja kapljica metala zavora.



Slika 32. Uzorak 1.1

Slikom 33 prikazan je uzorak 1.2. Oko zavora vidljivo je vrlo tanka linija zacrnjenja osnovnog materijala. Zavar vizualno dobro izgleda, nema znakova šćanja.



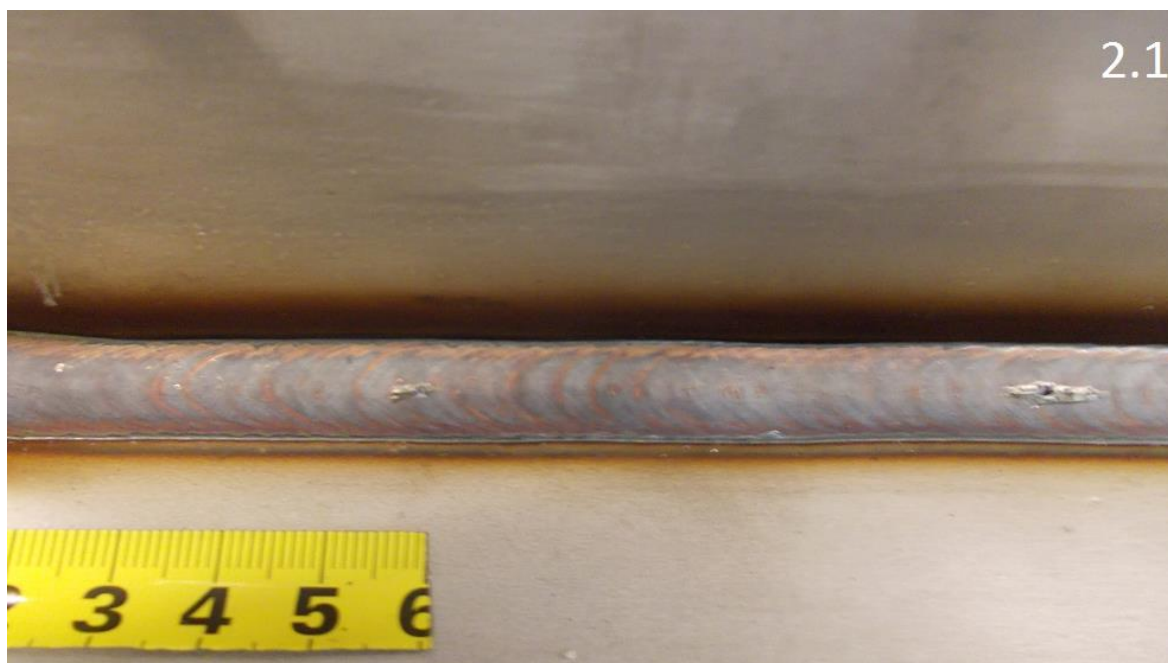
Slika 33. Uzorak 1.2

Slika 34 prikazuje uzorak 1.3. Na ovom uzorku je zacrnjenje osnovnog materijala mnogo jače nego u prethodnim slučajevima (isto kao i u slučaju navarivanja). Na pojedinim mjestima uzduž spoja vide se bobice nastale zbog štrcanja metala zavora.



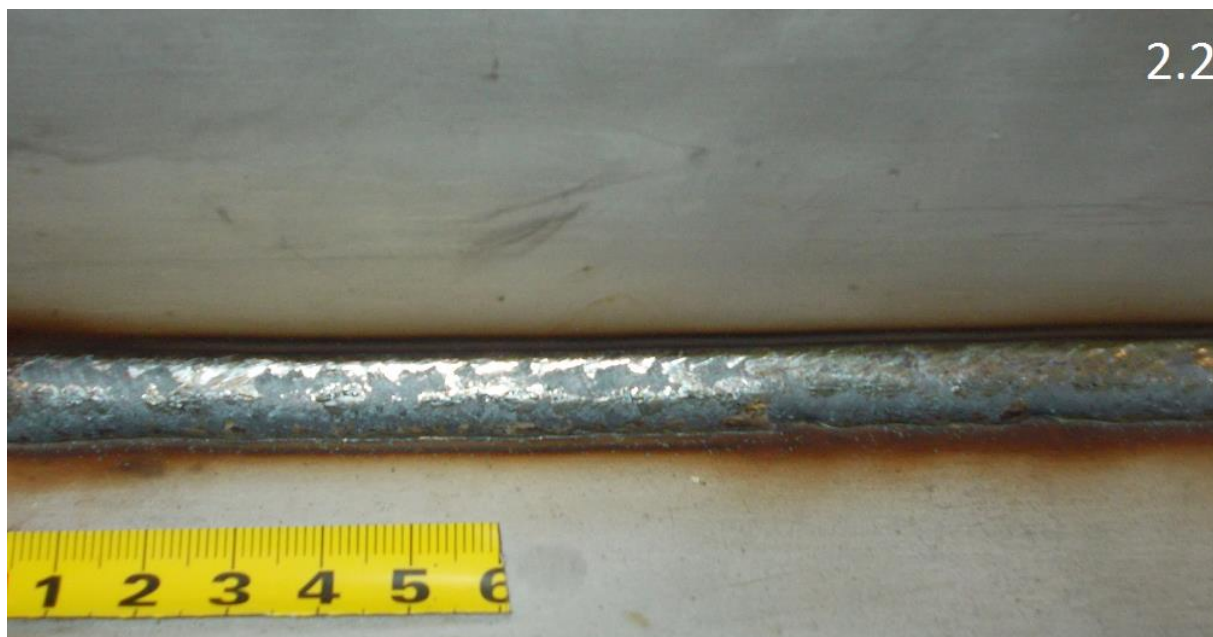
Slika 34. Uzorak 1.3

Na slici 35 prikazan je uzorak 2.1. Vidi se zacrnjenje materijala samo s gornje strane zavora, nešto više nego u prethodnom slučaju na zavaru 1.1 kod kojeg je bio manji unos topline.



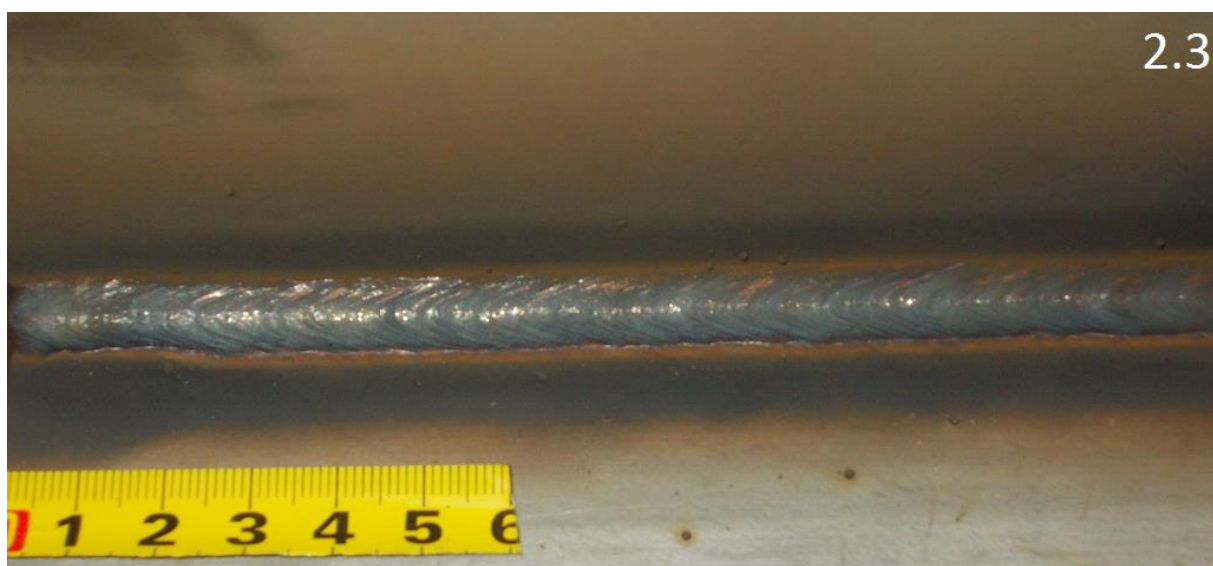
Slika 35. Uzorak 2.1

Slika 36 prikazuje uzorak 2.2 kod kojeg je vidljivo zacrnjenje s obje strane zavora. S gornje strane nešto više nego s donje ali svejedno ne kao na uzorku 2.1.



Slika 36. Uzorak 2.2

Slika 37 prikazuje uzorak 2.3. Vidljivo je jako zacrnjenje s obje strane zavora i malo štreanja s gornje strane.



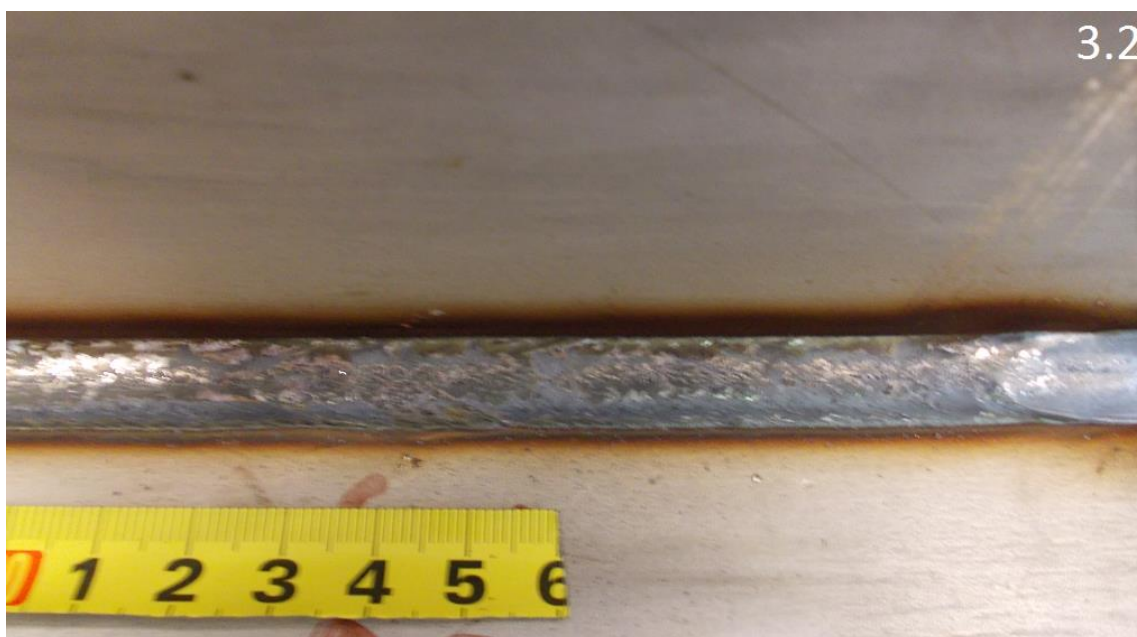
Slika 37. Uzorak 2.3

Slika 38 prikazuje uzorak 3.1 kod kojeg je vidljivo povećano zacrnjenje s gornje strane zavarate oko početka i s donje strane.



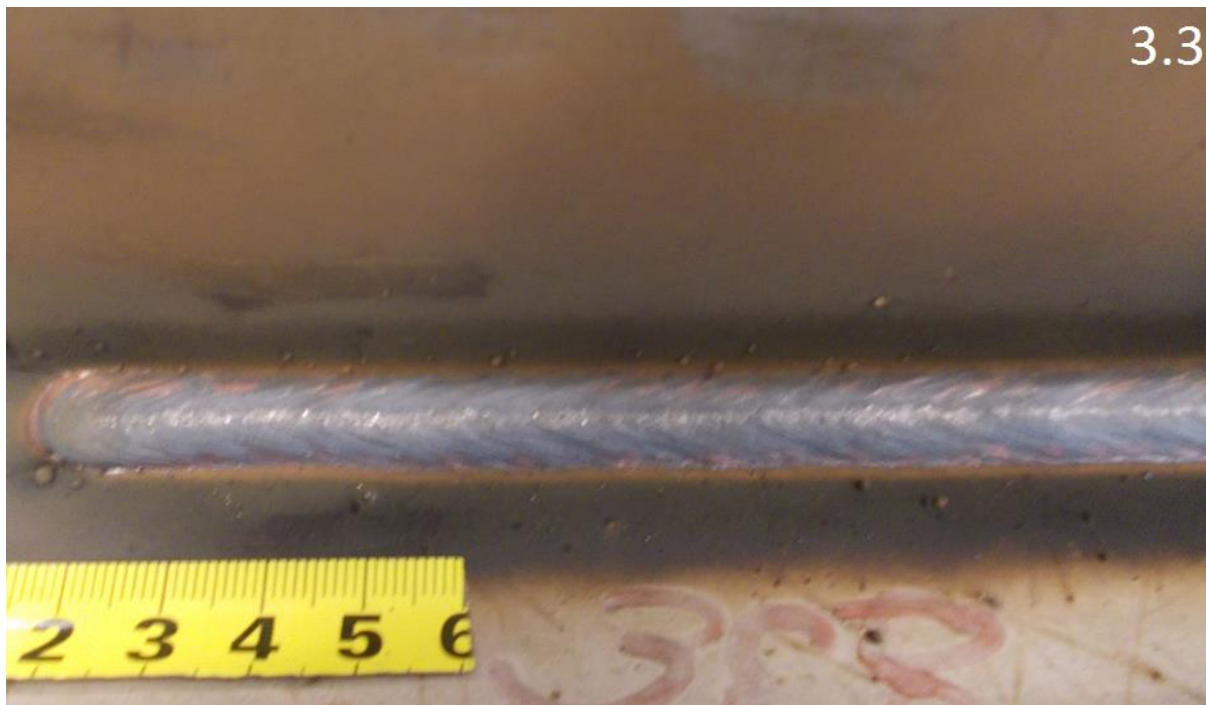
Slika 38. Uzorak 3.1

Na slici 39 prikazan je uzorak 3.2 na kojem je vidljivo zacrnjenje s gornje strane zavarate. Na donjoj strani je vidljiva tanka crna linija.



Slika 39. Uzorak 3.2

Slika 40 prikazuje uzorak 3.3 koji ima najjače zacrnjenje osnovnog materijala s obje strane zavora. Također je vidljivo i najjače štrcanje metala zavora u usporedbi s dosadašnjim uzorcima.

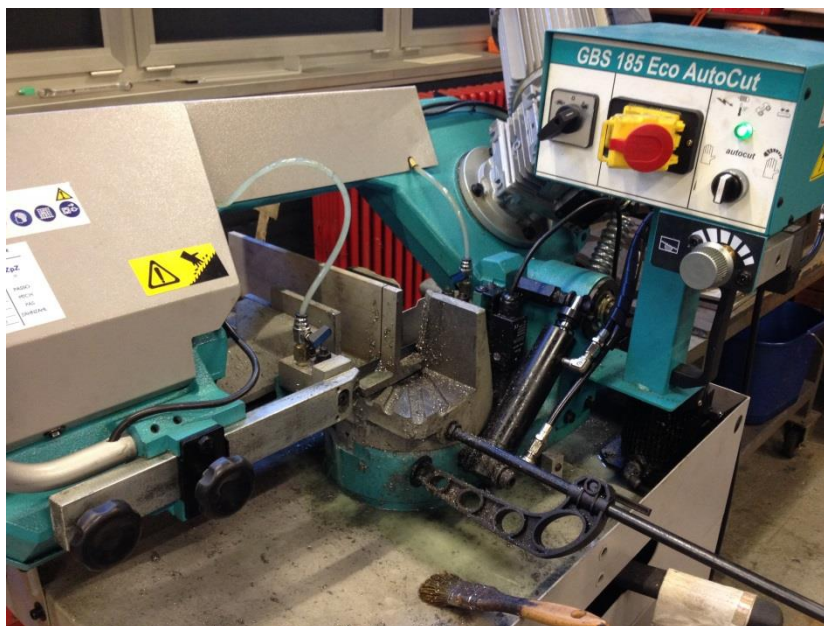


Slika 40. Uzorak 3.3

8.3. Izrada uzoraka

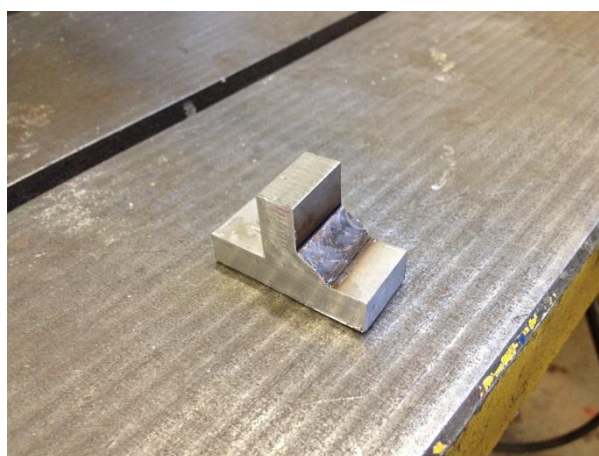
8.3.1. Izrezivanje uzoraka

Nakon provedenog navarivanja i zavarivanja potrebno je iz velikih uzoraka izrezati manje na kojima se radi makroizbrusak te kasnije geometrija zavora. Izrezivanje se obavlja na tračnoj pili „IMET GBS 185 ECO“ (slika 41), tako da se izvadi uzorak na udaljenosti od 60 mm od početka zavora, mjestu na kojem su se ustabilili parametri zavarivanja.



Slika 41. Izrezivanje uzoraka

Izgled uzorka nakon rezanja prikazan je na slici 42. Nakon toga uzorak je spreman za brušenje.



Slika 42. Izgled izrezanog uzorka

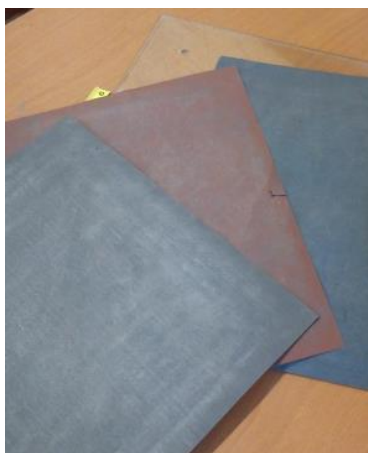
8.3.2. Brušenje uzoraka

Nakon izrezivanja uzoraka, uzorke je potrebno brusiti kako bi se dobila sjajna površina na kojoj je vidljiva penetracija na temelju koje se daju zaključci o utjecaju zaštitnog plina. Nakon rezanja prvi postupak je grubo brušenje na stupnoj brusilici brusnim kamenom granulacije 180 (slika 43).



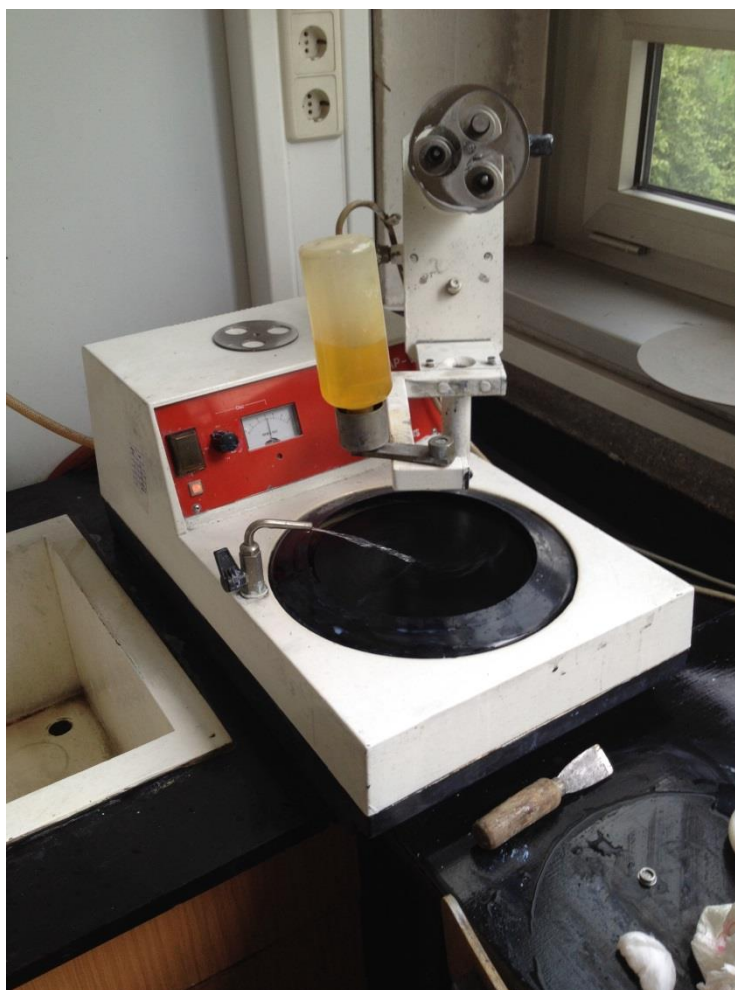
Slika 43. Grubo brušenje uzoraka

Navareni uzorci nakon grubog brušenja bruse se ručno brusnim papirom. Granulacije brusnog papira su redom 150, 320, 500. Brušenje kreće papirom s najvećom granulacijom, a to je 150. Nakon određenog vremena brušenja prelazi se na finiji brusni papir, tj. papir manje granulacije, sve dok se ne dođe do papira najmanje granulacije. Slika 44 prikazuje brusne papire za ručno brušenje uzorka.



Slika 44. Brusni papir za ručno brušenje

Uzorci sa kutnim spojem bruse se pomoću uređaja „Grinder“ koji se okreće brzinom 300 o/min. Na uređaju se mijenjaju brusni papiri granulacija 320, 500, 1200, 2000 i na kraju 4000. Tijekom brušenja protiče voda koja odnosi odvojene čestice, a ujedno i sprječava zagrijavanje uzorka. Slikom 45. prikazan je uređaj za brušenje kutnih uzoraka.

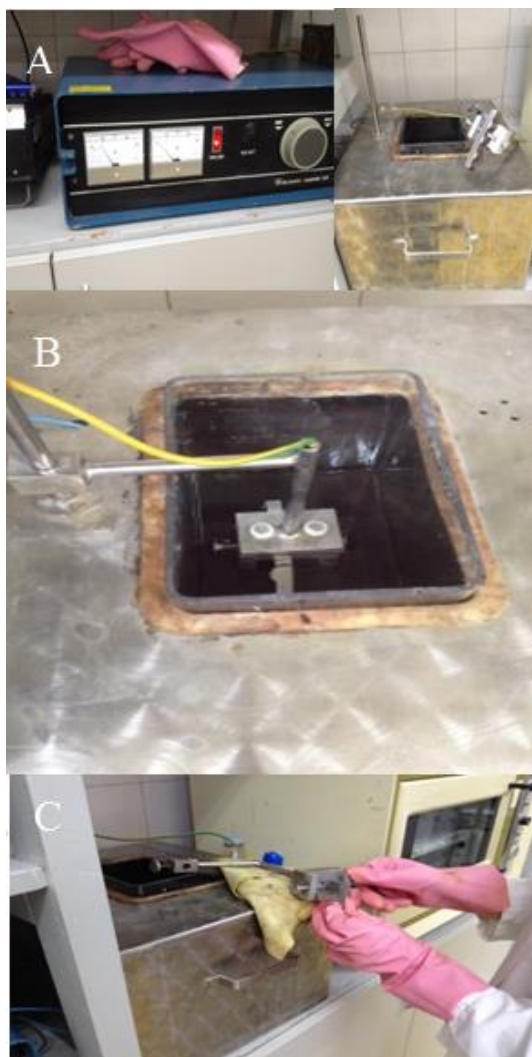


Slika 45. Brušenje kutnih uzoraka

Vrijeme trajanja brušenja iznosi oko 10 min po uzorku, odnosno sve dok se ne dobija glatka i sjajna površina na kojoj je vidljiva jasna razlika između metala zavara i osnovnog materijala.

8.3.3. Nagrizanje uzoraka

Nakon brušenja, kojim se dobije glatka površina na kojoj je vidljiva penetracija u osnovni materijal, uzorci se nagrizzaju u 10 % oksalnoj kiselini kako bi se još više izrazile linije između osnovnog metala i metala zavarara. Nagrizanje se odvija pomoću uređaja za elektrokemijsko nagrizzanje koji se sastoji od izvora struje i kućišta sa kiselinom u koju se stavlja uzorak. Nakon što se uzorak učvrsti i uroni u kiselinu počinje teći struja jakosti 2 A (napon 6 V). Vrijeme trajanja ispitivanja iznosi 5 minuta za navarivani uzorak i 2 minute za kutni uzorak. Postupak nagrizzanja uzoraka prikazan je slikom 46.

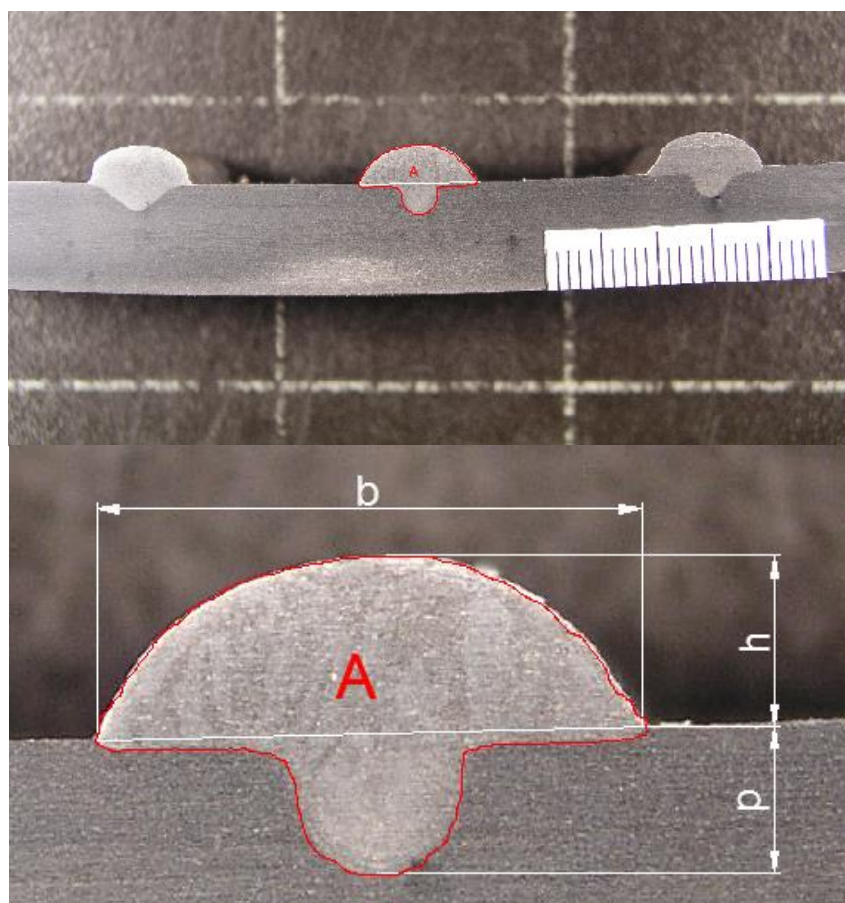


Slika 46. Elektrokemijski postupak nagrizzanja uzoraka

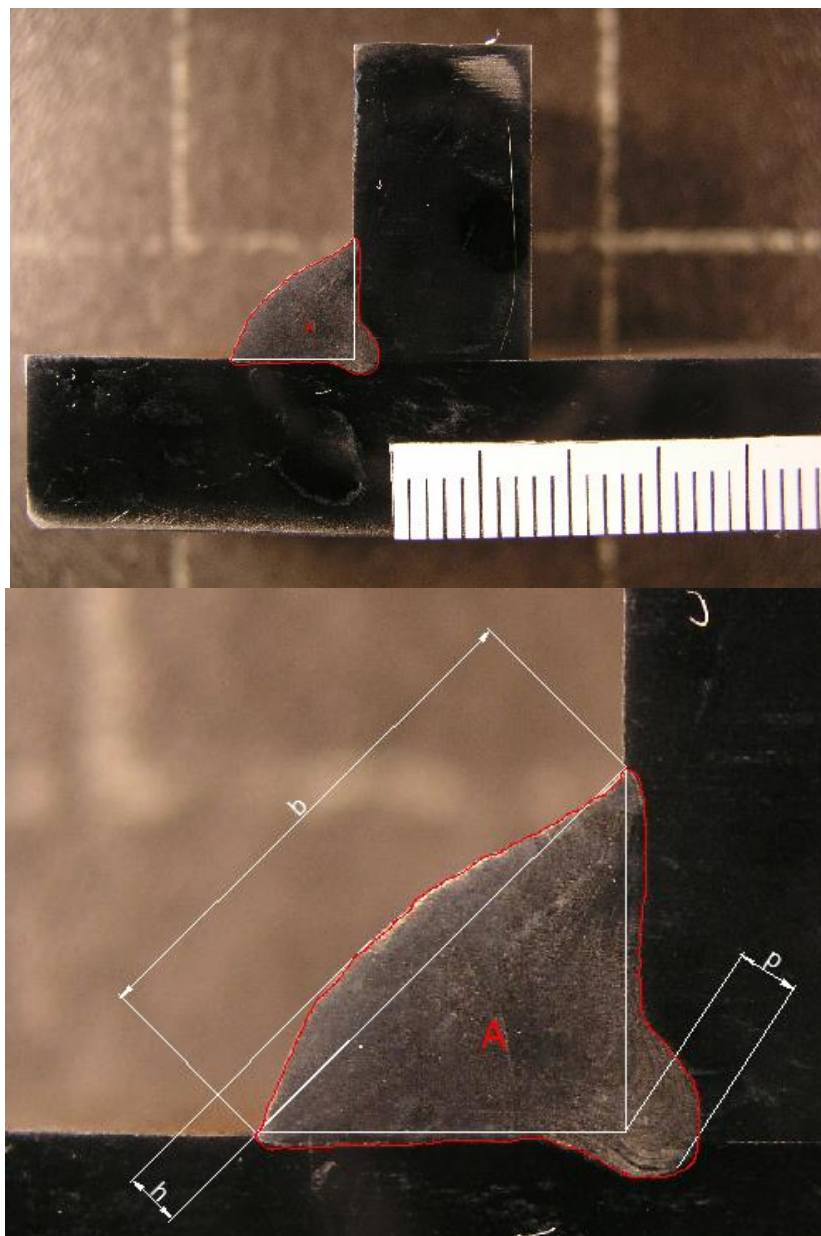
Na A dijelu slike 46 prikazan je uređaj za elektrokemijsko nagrizzanje. Dio B prikazuje uronjen uzorak za vrijeme nagrizzanja dok dio C prikazuje vađenje uzorka iz kiseline.

8.4. Geometrija zavora

Slikama 47 i 48 su prikazane karakteristične izmjere geometrije zavora. Izmjerene vrijednosti zajedno sa slikama uzoraka dane su u tablicima 11 i 12. Mjerenje geometrije zavora se radi u programu ImageJ koji omogućuje mjerenje na slikama uzoraka što ubrzava postupak mjerenja.

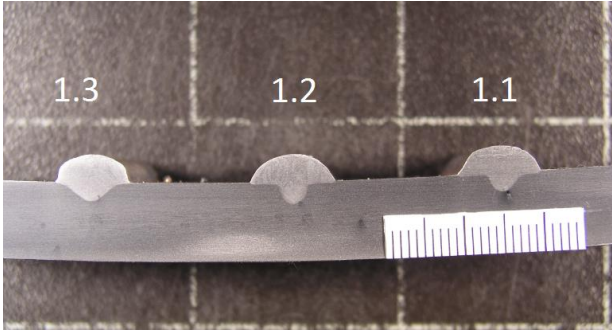
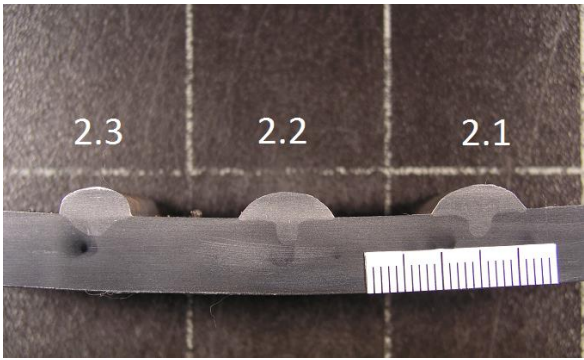
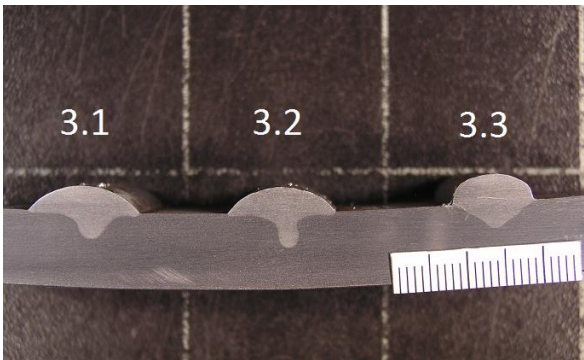


Slika 47. Mjere na navarenom uzorku

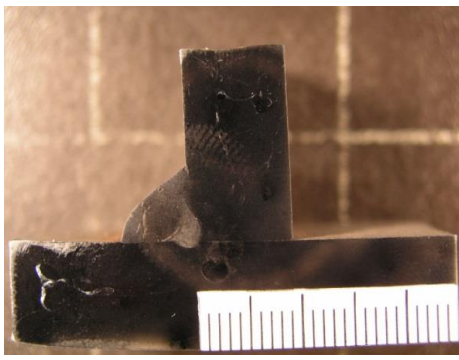
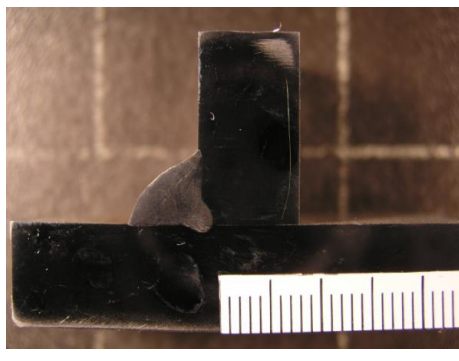
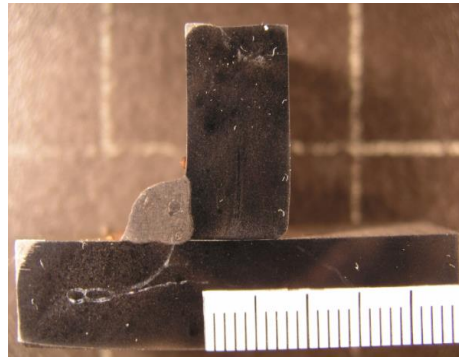
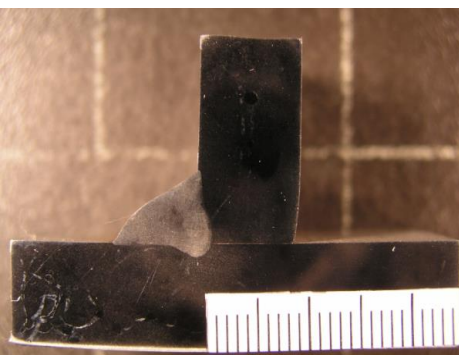


Slika 48. Mjere na kutnom uzorku

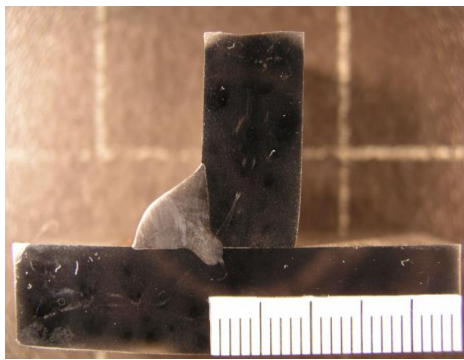
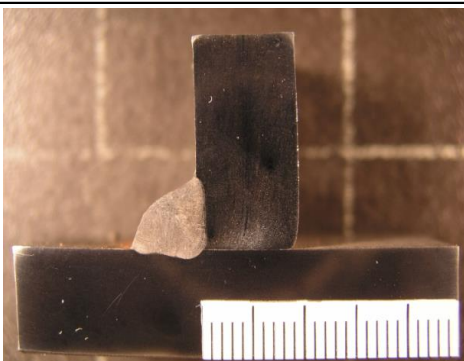
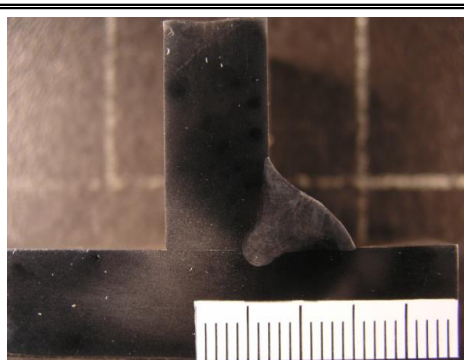
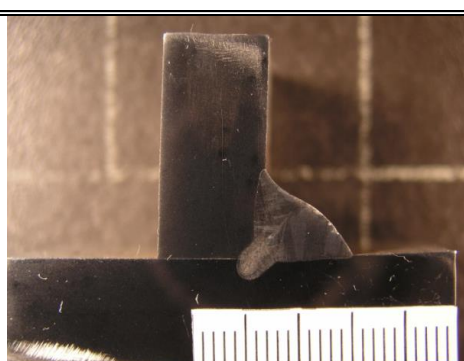
Tablica 11. Geometrija navarenih uzoraka

	Oznaka uzorka			Makroizbrusak
	1.1	1.2	1.3	
Širina zavora, mm	10,5	10,56	9,6	
Nadvišenje, mm	3,36	3,31	3,3	
Penetracija, mm	2,39	3,12	2,39	
Površina metala zavora, mm ²	35,6	37,19	35,81	
	2.1	2.2	2.3	
Širina zavora, mm	12,3	12,54	9,89	
Nadvišenje, mm	3,3	3,11	3,49	
Penetracija, mm	3,57	3,4	2,75	
Površina metala zavora, mm ²	42,67	42	41,86	
	3.1	3.2	3.3	
Širina zavora, mm	14,88	14,15	10,9	
Nadvišenje, mm	3,18	3,27	3,54	
Penetracija, mm	3,35	4,45	3,36	
Površina metala zavora, mm ²	50,95	49,58	51,01	

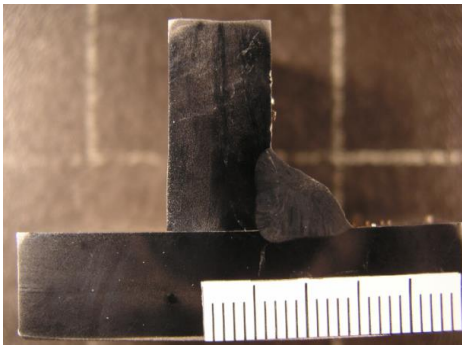
Tablica 12. Geometrija kutnih uzoraka

Oznaka uzorka	Širina zavora, mm	Nadvišenje, mm	Penetracija, mm	Površina metala zavora, mm ²	Makroizbrusak
1.1	9,32	1,05	1,18	33,95	
1.2	9,74	1,08	1,25	36,18	
1.3	8,63	1,75	0,43	30,73	
2.1	10,54	0,77	1,29	39,99	

Nastavak tablice 12

Oznaka uzorka	Širina zavora, mm	Nadvišenje, mm	Penetracija, mm	Površina metala zavora, mm ²	Makroizbrusak
2.2	10,39	1,21	2,36	44	
2.3	9,28	1,2	0,5	36,35	
3.1	11,51	0,62	1,84	47,29	
3.2	11,22	0,74	2,48	49,98	

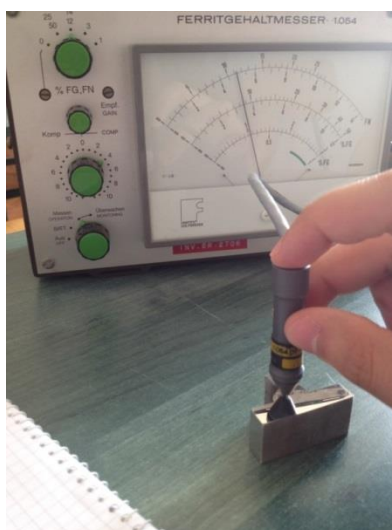
Nastavak tablice 12

Oznaka uzorka	Širina zavora, mm	Nadvišenje, mm	Penetracija, mm	Površina metala zavora, mm ²	Makroizbrusak
3.3	10,58	0,95	0,95	48,01	

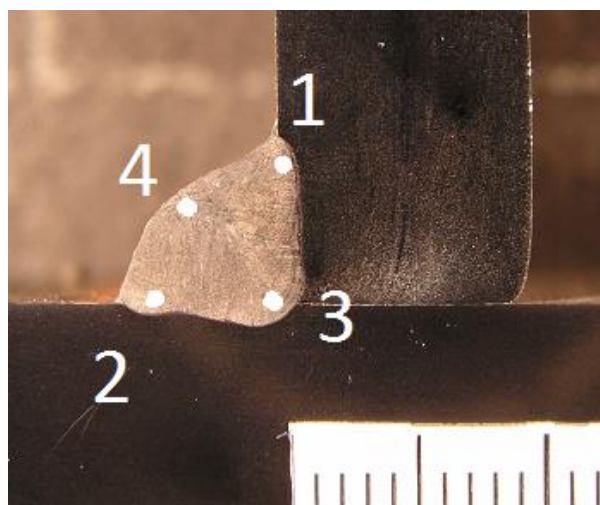
U tablicama 11 i 12 vidljive su sve karakteristične mjere na ispitnim uzorcima. Na temelju tih podataka donose se određeni zaključci u analizi rezultata.

8.5. Mjerenje feritnog broja

Feritna faza nastaje u austenitnom čeliku uslijed povišene temperature tijekom zavarivanja. Feritni broj (FN) označava sadržaj delta ferita u metalu zavora nehrđajućeg čelika. FN se mjeri uređajem „Ferritgehaltmesser 1.054“ (slika 49) koji se najprije umjerava a zatim se mjeri na uzorcima. Slika 50 prikazuje mjesta na metalu zavora na kojima se mjeri feritni broj.



Slika 49. Mjerenje feritnog broja



Slika 50. Mjesta mjerenja feritnog broja

U tablici 13 prikazani su dobiveni rezultati mjerenja.

Tablica 13. Rezultati mjerenja feritnog broja

Uzorak	Mjerenje	FN	Uzorak	Mjerenje	FN	Uzorak	Mjerenje	FN
1.1	1	4,0	1.2	1	4,8	1.3	1	5,4
	2	3,5		2	4,2		2	4,3
	3	3,0		3	3,7		3	3,9
	4	4,2		4	4,8		4	4,7
2.1	1	4,6	2.2	1	5,9	2.3	1	5,5
	2	4,9		2	5,2		2	5,0
	3	4,0		3	4,0		3	4,0
	4	4,9		4	5,4		4	4,8
3.1	1	4,7	3.2	1	5,2	3.3	1	5,2
	2	4,5		2	5,4		2	5,6
	3	4,0		3	4,5		3	4,5
	4	4,4		4	5,2		4	6,0

Prihvatljivi iznosi FN kreću se u granicama od 2 do 10 . Iz tablice je vidljivo kako se udio delta ferita na mjerenim mjestima kreće od 3 do 6 što spada u dozvoljeni iznos delta ferita u austenitnom čeliku.

8.6. Analiza rezultata

Nakon što se provedu sva ispitivanja moguće je analizirati utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavora.

Kod navarenih uzoraka širina zavora dobivena korištenjem plinova M12 i M13 vrlo je slična, dok plin R1 daje užu zavor. Povećanjem unosa topline razlika u širini se povećava. Tako kod unosa topline od 5,5 kJ/cm razlika u širini iznosi oko 1 mm. Kod unosa topline od 7,2 kJ/cm razlika se povećava na približno 2,5 mm, dok kod unosa topline od 8,7 kJ/cm razlika iznosi oko 3 mm.

Nadvišenje zavora je kod unosa topline od 5,5 kJ/cm jednako za sva tri plina. Kod ostala dva unosa nadvišenje kod plina R1 je nešto veće nego kod plinova M12 i M13.

Dubina penetracije nešto je veća kod plina M13. Bitna razlika je u širini penetracije koja je za plinove M12 i M13 uža nego kod plina R1. Kod plina R1 veći se dio metala zavora nalazi u osnovnom materijalu nego na površini materijala. Površina metala zavora približno je jednaka za svaki uzorak u istom rangu unosa topline, a širina zavora kod plina R1 manja je od ostalih. Ako je površina metala zavora na uzorku manja, znači da je penetracija veća.

Kod uzoraka kutnog spoja također je vidljiva razlika u izgledu površine metala zavora. Prvenstveno se to odnosi na izgled penetracije.

Kod unosa topline od 5,5 kJ/cm najveću površinu metala zavora daje plin M13, zatim M12 te na kraju R1. Uzorci 1.1 i 1.2 sličnog su izgleda i dimenzija dok se 1.3 razlikuje u širini zavora, dosta manjoj penetraciji i najvećem nadvišenju.

Kod unosa topline od 7,2 kJ/cm najveću površinu metala zavora ima uzorak 2.2, dok uzorak 2.3 ima oko 20 % manju površinu. Širina zavora uzorka 2.3 je također najmanja. Kod ovog unosa topline iznos nadvišenja za plinove M13 i R1 iznosi 1,2 mm dok je za plin M12 oko 0,8 mm. Izgled penetracije je također kao i kod prethodnog unosa topline. Na uzorcima 2.1 i 2.2 koncentriran u sredini zavora dok je kod uzorka 2.3 raspoređen gotovo ravnomjerno po cijeloj širini zavora.

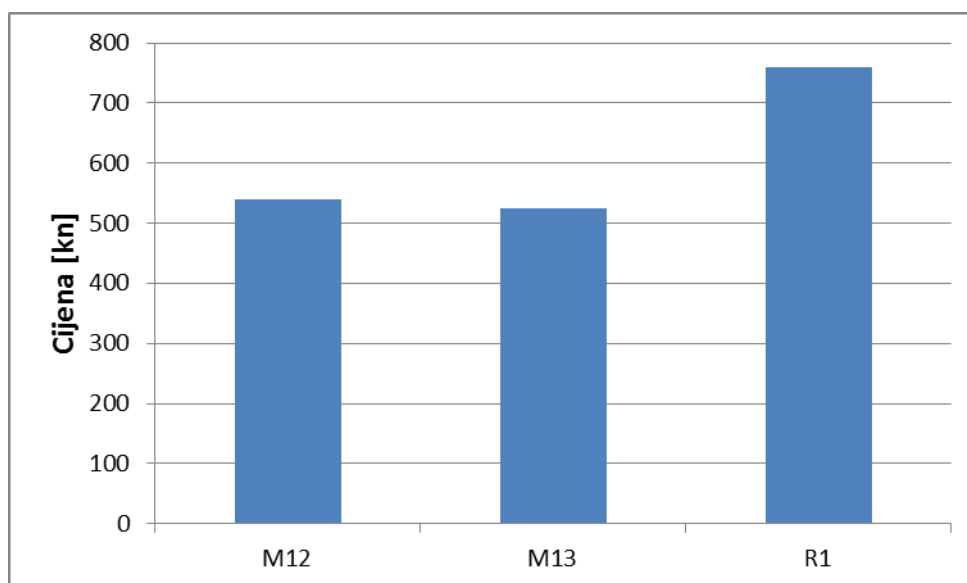
Unos topline od 8,7 kJ/cm daje najveće površine metala zavora, približno jednake za sva tri uzorka. Širine zavora su također slične. Kod ovog unosa topline nadvišenja su najmanja. Penetracija je veća, jednakog izgleda kao i u prethodnim slučajevima.

Kod svih unosa topline vidljivo je kako se metal zavora lagano razlijeva kod plinova M12 i M13, dok je kod plina R1 ostao gotovo ravnomjerno raspoređen.

Analizirajući rezultate mjerenja feritnog broja vidi se da je on najmanji u području korijena zavora (točka 3/slika 50), pa se lagano povećava prema rubovima zavora i površini. Udio delta ferita se kreće u granicama od 3 % do 6 % što je zadovoljavajući rezultat za austenitne čelike.

8.7. Osvrt na trošak plina

Važan utjecaj na odabir zaštitnog plina za zavarivanje je i sama cijena plina. Slika 51 prikazuje usporedbu cijena plinova. Cijena se odnosi na punjenje od 150 bara. Mješavine M12 i M13 su približno jednakih cijena i daju slične podatke u geometriji i zgledu zavarenog spoja. Mješavina R1 ima oko 30 % višu cijenu i dosta se razlikuje u rezultatima od prethodnih plinova. Prije samog odabira zaštitnog plina u obzir treba uzeti rezultate provedenog ispitivanja i usporediti da li je neki plin isplativiji za određene vrste zavora iako ima višu cijenu.



Slika 51. Cijene plinova

9. ZAKLJUČAK

Visokolegirani čelici su pronašli primjenu u mnogim granama industrije. Svaki dio opreme ili konstrukcije od visokolegiranog čelika je sastavljen od više dijelova koji su međusobno spojeni zavarivanjem. Upravo zbog toga, zavarljivost je jedno od najvažnijih svojstava visokolegiranih čelika. Čelik se bolje zavaruje ako ima manji udio ekvivalentnog sadržaja ugljika. Nakon odabira postupaka važno je odabrati najbolje parametre zavarivanja. Svaki postupak ima svoje optimalne parametre koje je potrebno podesiti kako bi zavareni spojevi u konačnici zadovoljavali sve kriterije. Bitan parametar kod zavarivanja je odabir zaštitnog plina.

Usporedbom rezultata dobivenih ispitivanjem utjecaja različitog zaštitnog plina u kombinaciji s različitim unosom topline moguće je donijeti zaključke o kvaliteti i izgledu zavarenog spoja kako slijedi:

- Argon, u mješavini sa ugljičnim dioksidom, kisikom i helijem daje lijep izgled zavarenog spoja bez grešaka. Na uzorcima nema tragova naljepljivanja ni pukotina u zavarenom spoju. Oko površine zavara je vidljivo zacrnjenje, najviše kod mješavine R1 kod koje je došlo i do štrcanja metala zavara kod sva tri unosa topline.
- Metali zavara dobiveni zaštitnim plinom R1 imaju manju površinu od metala zavara dobivenih plinovima M12 i M13. Manje dimenzije zavara na površini dopunjuju se u penetraciji. Kod uzoraka zavarivanih sa plinom R1 penetracija je bolje raspoređena po cijeloj širini zavara, dok je kod plinova M12 i M13 došlo do uskog područja penetracije ispod sredine zavara. Penetracija se prema rubovima zavara smanjuje, na kojima je minimalna.
- Plin R1 drži talinu na okupu dok je na uzorcima zavarivanim plinovima M12 i M13 vidljivo bježanje taline u jednu stranu zbog utjecaja zaštitnog plina na viskoznost taline.
- Udio nastalog delta ferita uslijed zavarivanja ne ovisi mnogo o zaštitnom plinu. Dobiveni rezultati kreću se u rasponu od 3 – 6. Povećanjem unosa topline povećava se i udio delta ferita.

Ako se usporede cijene plinova vidljivo je da je mješavina sa helijem skuplja oko 30 % od mješavina sa ugljičnim dioksidom i kisikom. Predlažu se dodatna ispitivanja u kojima bi se promjenom parametara kao što su brzina zavarivanja i protok plina moglo zaključiti da li mješavina R1 može kompenzirati višom nabavnom cijenom.

10. POPIS LITERATURE

- [1] Stawowy, H.: Produkcja stalowych – stan i rozwój w technologii i gospodarstwie, *Časopis Zavarivanje* 39, 1996.
- [2] Juraga I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju, *Časopis Zavarivanje* 3/4, siječanj 1994.
- [3] Schiller, B.; Kekić, M.: Atestacija postupaka zavarivanja visokolegiranih korozijskih postojanih čelika, *Časopis Zavarivanje* 3/4, 2001.
- [4] Juraga, I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju, *Časopis Zavarivanje* 1/2, Zagreb, 1994.
- [5] Juraga, I., et al.: Zavarivanje visokolegiranih čelika -zbornik radova
- [6] Kožuh S., Specijalni čelici, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [7].....: http://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CCwQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.fsb.unizg.hr%2Fusb_frontend%2Ffiles%2F1383141195-0-repetitorij2_im.ppt&ei=Y081VcqfHoLoaoPdIgB&usg=AFQjCNHTbDAzTZLINnhH357Te2DAS4SgkA&bvm=bv.91071109,d.d2s; (dostupno: 18.04.2015.)
- [8] Brkić S., Priručnik: Nehrđajući čelici u farmaceutskoj, prehrambenoj i kemijskoj industriji, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2007.
- [9].....: http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1416223327-0-zavarljivost_osnovnanaela.pdf; (dostupno: 18.04.2015.)
- [10] Filetin T., Kovačiček F., Indof J. Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2007.
- [11].....: <http://www.fsb.unizg.hr/kmb/700/720/kmb723.htm>; (dostupno: 19.04.2015.)
- [12].....: <http://www.r-techwelding.co.uk/support/article28.php>; (dostupno: 19.04.2015.)
- [13] Kralj S., Andrić Š, Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, FSB, Zagreb, 1992.
- [14].....: <http://imgarcade.com/1/mig-torch/>; (dostupno: 19.04.2015.)
- [15].....: <http://flashcustoms.co.uk/category/enthusiasts-gigts/> (dostupno: 20.04.2015.)
- [16].....: http://dinse.eu/en/products/?product_category=811 (dostupno: 20.04.2015.)

- [17] Gojić M., Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak 2003.
- [18].....<http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>; (dostupno: 20.04.2015.)
- [19] Rowe M.D., Manning P.E., Zavarivanje niklenih legura, Časopis Zavarivanje 3/4, 2004.
- [20] Zavarivanje laserom, Prezentacija doc.dr.sc. Ivica Garašić, Katedra za zavarene konstrukcije, FSB
- [21] Richard E. Avery, Arthur H. Tuthill, Guidelines for the welded fabrication of nickel alloys for corrosion-resistance service, Nickel Development Institute, 1994.
- [22] Nils E. Larson, Influence of Shielding Gases on the Quality of Welds, 2nd International Symposium on „Orbital Welding in High Purity Industries“, La Baule/France
- [23] HRN EN ISO 14175:2008, Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke (ISO 14175:2008; EN ISO 14175:2008)
- [24].....<http://www.messer.hr/products/index.html> (dostupno: 02.06.2015.)
- [25] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D., Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, stručni članak
- [26] HRN EN 10216-5:2004, Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 5:Stainless steel tubes
- [27] HRI CEN ISO/TR 15608:2008, Zavarivanje - Upute za sustav razvrstavanja metalnih materijala (ISO TR 15608:2005; CEN ISO/TR 15608:2005)
- [28] HRN EN ISO 14343:2010, Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Žičane elektrode, trakaste elektrode, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nehrđajućih čelika i čelika otpornih na visoke temperature – Razredba (ISO 14343:2009; EN ISO 14344:2010)
- [29]] HRN EN 1011-1:2009, Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. Dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje